

**DEPOSICIÓN DE POLÍMEROS RECICLADOS MEDIANTE ROCIADO  
ELECTROESTÁTICO**

**ANTONIO JOSE RAMIREZ SARRIA**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA  
PROGRAMA DE INGENIERIA MECÁNICA  
SANTIAGO DE CALI  
2015**

**DEPOSICIÓN DE POLÍMEROS RECICLADOS MEDIANTE ROCIADO  
ELECTROESTÁTICO**

**ANTONIO JOSE RAMIREZ SARRIA**

**Proyecto de Grado para optar el título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director  
EMERSON ESCOBAR NUÑEZ  
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA  
PROGRAMA DE INGENIERIA MECÁNICA  
SANTIAGO DE CALI  
2015**

**Nota de aceptación:**

**Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Mecánico.**

**Faber Correa Ballesteros**

---

**Jurado**

**Miguel Ángel Hidalgo Salazar**

---

**Jurado**

**Santiago de Cali, 21 de mayo de 2015**

*Este trabajo está dedicado a mi familia que siempre me ha apoyado incondicionalmente en todos mis proyectos de vida y en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que nos ha permitido ser personas de bien, por su perseverancia y constancia en todo este proceso.*

## **AGRADECIMIENTOS**

El desarrollo de este trabajo fue posible gracias a la colaboración y acompañamiento de las siguientes personas:

Mi padre, el ingeniero Herbert Ramírez por su apoyo en los momentos más difíciles brindándome siempre su ayuda para superar los diferentes obstáculos que se presentaron.

Al profesor Emerson Escobar Núñez por la excelente dirección del trabajo, impulsándome siempre a realizar un trabajo superior y la gran disponibilidad para resolver nuestras inquietudes motivando el trabajo.

Al grupo GCIM por su colaboración, y disposición de los equipos para las pruebas. A nuestros profesores y compañeros de estudio de la Facultad de Ingeniería Mecánica, por su enseñanza y colaboración.

A todo el personal de los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Autónoma de Occidente por la colaboración brindada durante la fabricación de las piezas y el ensamblaje del proyecto.

## **CONTENIDO**

	<b>Pág.</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>14</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>15</b>
<b>1. OBJETIVOS</b>	<b>17</b>
<b>1.1 OBJETIVO GENERAL</b>	<b>17</b>
<b>1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS</b>	<b>17</b>
<b>2. ELECCIÓN DE PARÁMETROS DE RUGOSIDAD PARA LAS PROBETAS</b>	<b>18</b>
<b>2.1 PREPARACIÓN SUPERFICIAL DE LOS SUBSTRATOS</b>	<b>18</b>
<b>2.1.1 Lijado de probetas.</b>	<b>18</b>
<b>3. MEDICIONES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL</b>	<b>20</b>
<b>4. CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO</b>	<b>21</b>
<b>4.1 DSC PARA LDPE</b>	<b>23</b>
<b>4.2 DSC PARA ABS</b>	<b>24</b>
<b>4.3 DSC PARA UHMWPE</b>	<b>25</b>
<b>5. MOLIENDA DE LOS POLIMEROS RECICLADOS</b>	<b>26</b>
<b>5.1 POLIMERO RECICLADO</b>	<b>27</b>
<b>5.2 MOLIENDA DE POLÍMEROS</b>	<b>27</b>
<b>5.2.1 Pulverización LDPE.</b>	<b>28</b>
<b>5.2.2 Pulverización ABS.</b>	<b>28</b>

<b>6. PROCESO DE TAMIZADO DEL POLIMERO PULVERIZADO</b>	<b>29</b>
<b>6.1 MÁQUINAS TAMIZADORAS</b>	<b>29</b>
6.1.1 Máquina agitadora de tamices.	30
6.1.2 Tamizado manual.	31
6.1.3 Maquina tamizadora polinizadora.	31
<b>6.2 MEDICIÓN TAMAÑO DE PARTICULA MEDIANTE SEM</b>	<b>32</b>
<b>7. DEPOSICIÓN ELECTROSTÁTICA DE LOS POLÍMEROS</b>	<b>36</b>
<b>7.1 PREPARACIÓN DE PROBETAS PARA LA DEPOSICIÓN DEL POLÍMERO</b>	<b>36</b>
<b>7.2 PROCESO DE ROCIADO ELECTROSTÁTICO</b>	<b>36</b>
<b>8. PROCESO DE CURADO DE LAS PROBETAS</b>	<b>38</b>
<b>8.1 DESHIDRATACIÓN DE POLÍMEROS</b>	<b>38</b>
<b>8.2 CURADO DE LAS PROBETAS DE LDPE</b>	<b>39</b>
<b>8.3 CURADO DE LAS PROBETAS CON ABS</b>	<b>39</b>
<b>8.4 CURADO DE LAS PROBETAS CON UHMWPE</b>	<b>40</b>
<b>8.5 MEDICIÓN DEL ESPESOR DE LOS RECUBRIMIENTOS</b>	<b>40</b>
<b>9. ENSAYOS DE PIN-ON-DISK</b>	<b>43</b>
<b>9.1 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE PIN-ON-DISK</b>	<b>44</b>
9.1.1 Resultados para el ABS.	44
9.1.2 Resultados para el UHMWPE.	47
9.1.3 Resultados para el LDPE.	49

<b>10. NANOINDENTACIÓN</b>	<b>52</b>
<b>11. APLICACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS POLIMERICOS EN LA INDUSTRIA</b>	<b>60</b>
<b>12. CONCLUSIONES</b>	<b>62</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>63</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>66</b>



## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resultados del rugosímetro.	20
Tabla 2. Valores obtenidos de módulo de elasticidad reducido y dureza para los recubrimientos.	57
Tabla 3. Valores obtenidos mediante contacto elástico Hertziano de punto.	58
Tabla 4.DSC LDPE.	69
Tabla 5.DSC ABS.	69
Tabla 6.DSC UHMWPE.	70
Tabla 7. Resultados estadísticos de la prueba de pin on disk.	71

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Lijadora de bandas.	19
Figura 2. Rugosímetro Collins micro flat.	20
Figura 3. Calorímetro de barrido diferencial Q2000.	21
Figura 4. Grafica estándar DSC para termoplásticos.	22
Figura 5. DSC para Polietileno de baja densidad (LDPE).	23
Figura 6. DSC para Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).	24
Figura 7. DSC para polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE).	25
Figura 8. Molino criogénico MODEL 25 AC LAB PULVERIZER.	26
Figura 9. Tamiz del laboratorio de materiales de la UAO.	30
Figura 10. Tamiz manual.	31
Figura 11. Tamizadora polinizadora.	32
Figura 12. SEM JSM-6060LV.	33
Figura 13. SEM UHMWPE.	34
Figura 14. SEM ABS.	34
Figura 15. SEM LDPE.	35
Figura 16. Limpiador ultrasónico.	36
Figura 17. Máquina de deposición electrostática.	37
Figura 18. Manera adecuada de introducir las probetas al horno.	38
Figura 19. Probeta recubierta con una capa de ABS.	39
Figura 20. Probeta recubierta con dos capas de ABS.	40
Figura 21. Probeta recubierta con tres capas de ABS.	40

<b>Figura 22. Espesor de recubrimiento con 3 capas de ABS.</b>	<b>41</b>
<b>Figura 23. Espesor de recubrimiento con 1 capa de UHMWPE.</b>	<b>41</b>
<b>Figura 24. Espesor de recubrimiento con 3 capas de LDPE.</b>	<b>42</b>
<b>Figura 25. Máquina para prueba de pin-on-disk.</b>	<b>43</b>
<b>Figura 26. Gráfica de los 4 resultados de coeficiente de fricción vs recorrido, para una carga aplicada de 10N.</b>	<b>45</b>
<b>Figura 27. Micrografía de la huella de desgaste de la probeta con recubrimiento de ABS después de prueba de pin-on-disk con 10N.</b>	<b>45</b>
<b>Figura 28. Gráfica de los 4 resultados de coeficiente de fricción vs recorrido, para una carga aplicada de 2N.</b>	<b>46</b>
<b>Figura 29. Micrografía de la huella de desgaste de la Probeta con recubrimiento de ABS después de prueba de pin-on-disk con 2N.</b>	<b>46</b>
<b>Figura 30. Grafica de los 4 resultados de coeficiente de fricción vs recorrido, para una carga aplicada de 2N.</b>	<b>47</b>
<b>Figura 31. Micrografía de la huella de desgaste de la Probeta con recubrimiento de UHMWPE después de prueba de pin-on-disk con 2N.</b>	<b>47</b>
<b>Figura 32. Gráfica de los 4 resultados de coeficiente de fricción vs recorrido, para una carga aplicada de 10N.</b>	<b>48</b>
<b>Figura 33. Micrografía de la huella de desgaste de la Probeta con recubrimiento de UHMWPE después de prueba de pin-on-disk con 10N.</b>	<b>48</b>
<b>Figura 34. Gráfica de los 4 resultados de coeficiente de fricción VS recorrido, para una carga aplicada de 2N.</b>	<b>49</b>
<b>Figura 35. Micrografía de la huella de desgaste de la Probeta con recubrimiento de LDPE después de prueba de pin-on-disk con 2N.</b>	<b>49</b>
<b>Figura 36. Gráfica de los 4 resultados de coeficiente de fricción VS recorrido, para una carga aplicada de 10N.</b>	<b>50</b>
<b>Figura 37. Probeta con recubrimiento de LDPE después de prueba de pin on disk.</b>	<b>51</b>
<b>Figura 38. Triboindentador TI950 (Hysitron).</b>	<b>52</b>

<b>Figura 39. Representación esquemática de la curva de carga y descarga generada durante un experimento de nanoindentación, la figura indica parámetros claves necesarios para el análisis.</b>	<b>53</b>
<b>Figura 40. SEM de la punta Berkovich; a) x120, b) x1500.</b>	<b>53</b>
<b>Figura 41. Área de calibración del cuarzo usado durante nanoindentación.</b>	<b>54</b>
<b>Figura 42. Carga normal vs profundidad de contacto durante la nanoindentación del LDPE.</b>	<b>55</b>
<b>Figura 43. Dureza a) y módulo de elasticidad reducido b) del ABS como función de la profundidad de contacto</b>	<b>56</b>
<b>Figura 44. Dureza a) y módulo de elasticidad reducido b) del UHMWPE como función de la profundidad de contacto.</b>	<b>57</b>
<b>Figura 45. Representación de contacto Hertziano de punto (esfera vs superficie plana)</b>	<b>59</b>

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>Anexo A. Resultados de la prueba de rugosidad</b>	<b>66</b>
<b>Anexo B. Resultados de la prueba DSC</b>	<b>69</b>
<b>Anexo C. Resultados estadísticos de la prueba de pin on disk</b>	<b>71</b>

## RESUMEN

En este proyecto de grado se desarrollaron y caracterizaron recubrimientos poliméricos a base de materiales reciclados depositados sobre sustratos metálicos, los polímeros reciclados que se utilizaron fueron el ABS, LDPE y UHMWPE, y los sustratos metálicos fueron el acero estructural AISI 1020 y el aluminio AISI 436 tipo 2. La caracterización de los recubrimientos se llevó a cabo usando técnicas como la nano indentación, la calorimetría diferencial del barrido, y la prueba de pin-on-disk, esta última para determinar el coeficiente de fricción dinámico entre el polímero y el pin (acero para este caso particular). El efecto de la rugosidad superficial en el anclaje mecánico entre el recubrimiento polimérico y el sustrato (delaminación) también fue evaluado. Para realizar estas pruebas primero se realizó un proceso de parametrización a los componentes metálicos y a los polímeros, esto para garantizar la homogeneidad en las pruebas, al principio los componentes metálicos solo eran platinas, las cuales se fresaron, rectificaron y lijaron para garantizar la homogeneidad a fin de utilizarlas como material base para depositar el polímero. Los polímeros eran pellets con tamaños de partícula hasta de 3 mm, estos se pulverizaron en un molino de discos y luego se tamizaron hasta llevarlos a un tamaño de partícula de 150  $\mu\text{m}$ , a fin de poder ser depositados mediante la técnica de rociado electrostático. Posteriormente, los recubrimientos fueron curados con el fin de mejorar la adherencia o el anclaje final entre el polímero y el sustrato. La microscopía electrónica de barrido (SEM), también fue empleada para determinar los tamaños de partículas después de la molienda y el espesor del recubrimiento polimérico después de la deposición y el curado.

**PALABRAS CLAVE:** Recubrimientos poliméricos, deposición electrostática, SEM, DSC, nanoindentación.

## INTRODUCCIÓN

Las matrices poliméricas más comunes son el polipropileno, el nylon y el policarbonato. Dependiendo del tipo de refuerzo, en la práctica con estas matrices se puede obtener un amplio margen de propiedades mecánicas. Los materiales termoplásticos se debilitan una vez sobrepasan la temperaturas de transición vítrea y en el caso del polietileno de baja densidad LDPE, se ha demostrado que este material puede ser exitosamente usado como lubricante sólido. Otros materiales termoplásticos como el polyetheretherketone (PEEK) han demostrado poseer una buena resistencia al desgaste, pero un coeficiente de fricción elevado, la buena resistencia al desgaste de este polímero, puede ser atribuida a su rígida estructura química y buena estabilidad a altas temperaturas debido a su alto punto de fusión 335 °C y alta temperatura de transición vítrea 135 °C. Por el contrario, el Politetrafluoroetileno (PTFE) o comúnmente conocido como Teflón, posee un muy bajo coeficiente de fricción, pero una alta tasa de desgaste. Estudios han mostrado que un volumen de aproximadamente 10-20% de PTFE en PEEK, permite obtener las tasas más bajas de desgaste y los valores más bajos de coeficiente de fricción en aplicaciones tribológicas. Los valores reportados de coeficiente de fricción oscilan alrededor de 0.1-0.2 y las tasas de desgaste entre  $10^{-6}$ - $10^{-5}$  mm<sup>3</sup>.N<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup> bajo condiciones de deslizamiento de 1 m<sup>-1</sup> y 1 MPa de presión de contacto. Los investigadores atribuyeron las bajas tasas de desgaste a la continua transferencia de capas de material polimérico a las asperezas de la contraparte. Otros investigadores han demostrado que en aplicaciones que involucran deslizamiento entre dos superficies, una vez el PEEK alcanza la temperatura de transición vítrea se produce un arreglo de las moléculas de polímero para formar granos cristalinos, tales regiones son conocidas como esferulitas las cuales son formadas debido a la cristalización del polímero. Estas regiones las cuales son más organizadas proveen un incremento en dureza lo cual redundará en un incremento en la resistencia mecánica y la resistencia al desgaste.

Con relación al desempeño tribológico de recubrimientos poliméricos depositados mediante la técnica de rociado, diferentes estudios han sido reportados y los mismos muestran el potencial de este tipo de recubrimientos en aplicaciones de lubricación seca.

El presente trabajo de grado busca desarrollar y caracterizar recubrimientos poliméricos en base a materiales reciclables depositados sobre componentes metálicos, utilizando pruebas como la nano indentación, la calorimetría diferencial de barrido (DSC), y la prueba de pin-on-disk, a fin de determinar si polímeros reciclados tales como el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), polietileno de baja densidad (LDPE) y polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE), presentan un buen desempeño desde el punto de vista tribológico. Adicionalmente, se

emplearon diferentes valores de rugosidad superficial para determinar el papel que juega este factor en el anclaje mecánico entre el recubrimiento polimérico y el sustrato.

Este proyecto va dirigido a los diferentes sectores metalmecánicos que trabajen con componentes mecánicos que estén expuestos a ambientes agresivos o sometidos a algún tipo de desgaste por deslizamiento relativo. Los problemas relacionados con el desgaste por deslizamiento se presentan en todas las áreas tecnológicas, sus soluciones varían y dependen de la aplicación de conceptos de la química, la física y la metalurgia, los cuáles a menudo no son conocidos por parte de quienes enfrentan inicialmente estos problemas, por esta razón este trabajo de grado se enfocó en darle una solución sencilla a estos problemas, mediante la deposición de recubrimientos poliméricos mediante rociado electrostático. Las aplicaciones más comunes en la industria donde se puede aplicar este proyecto de grado son, resistencia al desgaste, fines decorativos, y protección contra ambientes corrosivos, entre otras.

Con frecuencia además de la lubricación con fluidos aceitosos, una de las estrategias para controlar el desgaste en un metal es la aplicación de un recubrimiento protector sobre su superficie, con base en el conocimiento de las interacciones que experimentan los metales en contacto con el ambiente al cual están expuestos, las medidas protectoras que se pueden adoptar para prolongar la vida de servicio de componentes mecánicos han de ser compatibles, esto implica requerimientos como, estabilidad mecánica, transferencia térmica, resistencia al desgaste mecánico y alta estabilidad química con el material en contacto, debe ajustarse a los procedimientos de fabricación de las estructuras y dispositivos, así como responder a criterios de productividad económica. A nivel mundial el reciclaje de plásticos se justifica por razones económicas y ambientales, los costos de la materia prima resultan desfavorables para algunos productos, volviéndose atractivo para los empresarios usar los reciclados. El componente ambiental es aún más importante, sin embargo, “es incipiente el porcentaje de reciclaje de plásticos a nivel mundial, y en países subdesarrollados es aún menor”<sup>1</sup>. Con base en este escenario, estudios e implementación de tribomateriales que ayuden a mitigar el calentamiento global, constituye un área de gran interés a nivel mundial, ya que permitirá contribuir a la conservación del medio ambiente, mediante la reducción de la cantidad de material de desecho, y el menor uso de energía eléctrica.

---

<sup>1</sup> HIDALGO SALAZAR Miguel A., NEVES Fernando Luiz, BAENA Eduardo. Posibilidades de fabricación con el polietileno aluminio obtenido del reciclaje de envases multicapas. En: Informador Técnico. Sena Astin. Julio - Diciembre, 2013, vol.77 núm. 2.



## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar y caracterizar recubrimientos poliméricos a base de materiales reciclables depositados sobre sustratos metálicos.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Evaluar mediante pruebas de pin-on-disk los polímeros reciclables que presentan un mejor comportamiento desde el punto de vista tribológico.
- Determinar las propiedades mecánicas de los recubrimientos mediante pruebas de nanoindentación
- Investigar diferentes aplicaciones industriales donde estos recubrimientos pueden ser potencialmente aplicados (por ejemplo, reducción de fricción y desgaste por fricción, protección contra la corrosión).

## **2. ELECCIÓN DE PARÁMETROS DE RUGOSIDAD PARA LAS PROBETAS**

Un factor importante a tener en cuenta al momento de hacer una deposición electrostática polimérica, es el anclaje entre el polímero y el sustrato, de no tener un buen anclaje el polímero se delaminaría con un esfuerzo superficial mínimo, debido a que el anclaje depende del acabado superficial que tenga el sustrato, para caracterizar el anclaje de cada uno de los 3 polímeros depositados en los diferentes sustratos, se buscó contrastar 2 superficies una con la menor rugosidad posible (superficie lisa) y la otra con mucha rugosidad (superficie lijada).

### **2.1 PREPARACIÓN SUPERFICIAL DE LOS SUBSTRATOS**

Los sustratos se prepararon utilizando dos tipos de acabados; liso y rugoso. La preparación de la superficie de aluminio fue llevado a cabo mediante su maquinado a través del proceso de fresado (acabado liso), mientras que el acabado rugoso del mismo material fue obtenido mediante lijado con máquina usando una lija número 80. Para el caso del acero se empleó la máquina rectificadora para el acabado liso, mientras que para el rugoso se utilizó la misma máquina y lija que para el aluminio.

Con el fin de mejorar el anclaje mecánico entre el recubrimiento y el sustrato, la superficie de este último debe prepararse para garantizar la adhesión, una vez el recubrimiento pasa por la fase de curado. A nivel industrial se recurre al proceso de impacto mediante partículas con óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) o blasting, a fin de garantizar una mejor adhesión dado el caso que la rugosidad de la superficie después del acabado superficial no sea suficiente para lograr el anclaje mecánico.

**2.1.1 Lijado de probetas.** Para el lijado de las probetas se utilizó la máquina lijadora de banda (ver figura 1), esta dejaba surcos rectos en las probetas lo cual es ideal para la medición de rugosidad, y no tomaba mucho tiempo lijar una probeta, además cambiar la lija era sencillo, así que se utilizó esta máquina para lijar todas las probetas.

**Figura 1. Lijadora de bandas.**



### 3. MEDICIONES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL

Para medir la rugosidad de todas las superficies de las probetas, se utilizó el rugosímetro Collins micro flat de la Universidad del Valle (ver figura 2), este es un dispositivo que determina los picos en una superficie por medio de un palpador, la unidad de medida es  $\mu\text{m}$ , para utilizar este equipo primero se posicionó el palpador sobre la superficie de la probeta, y se ajustaron los parámetros de operación, en este caso fueron 0,8 mm de recorrido, a una velocidad de 4 mm/s y perpendicular a la superficie de lijado de la probeta, se realizaron 10 mediciones en posiciones aleatorias de la superficie de la probeta, para así calcular un promedio de la rugosidad de la superficie, los resultados de cada una de las probetas se observan en la tabla 1, en el Anexo A se pueden observar los resultados detallados para todas las pruebas.

**Figura 2. Rugosímetro Collins micro flat.**



**Tabla 1. Resultados del rugosímetro.**

	ACERO	ALUMINIO
	promedio ( $\mu\text{m}$ )	promedio ( $\mu\text{m}$ )
Rectificado, Fresado (liso)	0,517	0,473
Lija 80 (rugoso)	0,973	1,564

#### 4. CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO

La calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en inglés) es utilizada para mediciones cuantitativas de cambios energéticos a bajas y altas temperaturas. La DSC mide la energía que debe ser aplicada, para mantener las temperaturas de la muestra y la de otra referencia iguales durante un cambio de fase. En esta técnica, la muestra no requiere una preparación especial, basta con ubicar el material en el portamuestras (no más de 30 mg). La referencia se escoge de tal forma que no sufra ninguna transición en el rango de temperatura de trabajo, normalmente se usan cápsulas de aluminio como muestra de referencia. La información obtenida del DSC se grafica analizando el flujo calórico (mJ/s) como función de la temperatura.

En las mediciones de DSC se utilizó un Calorímetro de Barrido Diferencial Q2000 (TA Instruments) del Laboratorio de Análisis Térmico de la Universidad Autónoma de Occidente, el cual determina la temperatura y el flujo de calor asociado con las transiciones del material como una función del tiempo y la temperatura. Esta técnica suministra datos cuantitativos y cualitativos sobre los procesos endotérmicos (absorción de calor) y exotérmicos (liberación de calor) de los materiales, que durante la transición física son causados por cambios de fase, fundición, oxidación, y otros cambios relacionados con el calor.

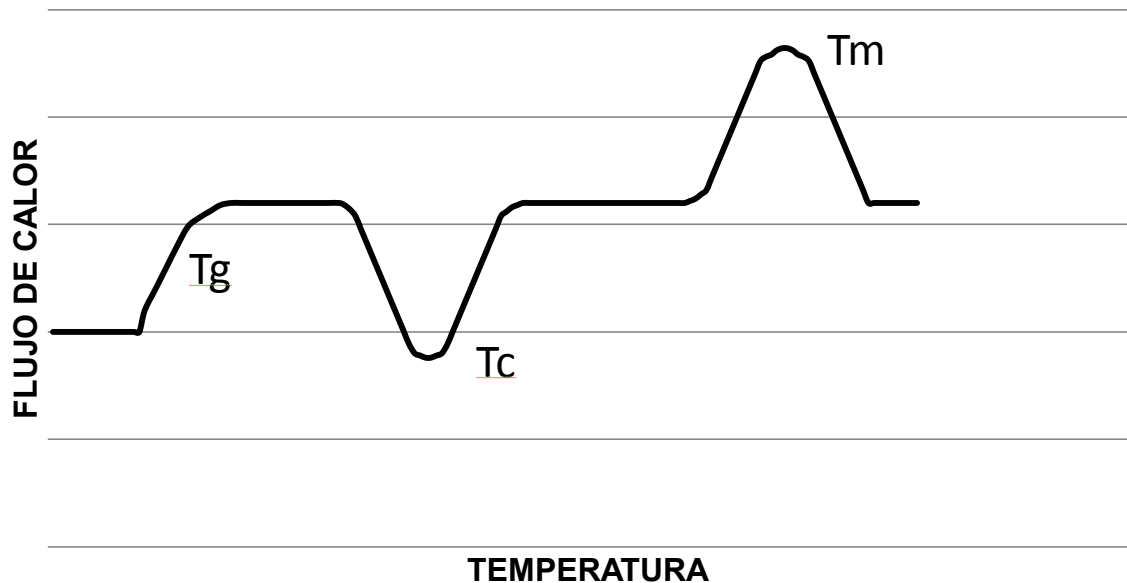
El DSC Q2000 (ver figura 3), trabaja en conjunto con un controlador y un software asociado que caracteriza el sistema de análisis térmico. Para el presente estudio las pruebas fueron realizadas de forma modulada con una frecuencia de 1 °C cada 60s.

**Figura 3. Calorímetro de barrido diferencial Q2000.**



Se realizó DSC a tres materiales, Polietileno de baja densidad (LDPE), Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) y Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), la gráfica estándar de flujo de calor vs temperatura para este tipo de materiales termoplásticos se puede observar en la figura 4, en esta gráfica se pueden observar los 3 puntos principales que experimenta un termoplástico durante la adición de calor, el primer punto  $T_g$ , no es un estado, es la transición vítrea, este es el punto donde las cadenas amorfas del polímero ganan la suficiente energía para desplazarse en cualquier dirección. El segundo punto es la  $T_c$ , éste es el punto donde los polímeros adoptan una disposición sumamente ordenada, la temperatura de cristalización del polímero, en la gráfica de DSC flujo de calor vs temperatura esta se observa como una depresión, que se encuentra después de la transición vítrea. Si se analiza un polímero 100% amorfo, no obtendríamos ninguna cristalización, cuando los polímeros se disponen en ordenamientos cristalinos, liberan calor, por esto decimos que la cristalización es una transición exotérmica. El último punto es  $T_m$  y este es la temperatura de fusión, que es el punto donde el polímero cambia de un estado sólido a líquido, esta se observa en la gráfica como un pico alto de flujo de calor y es porque es un proceso endotérmico.

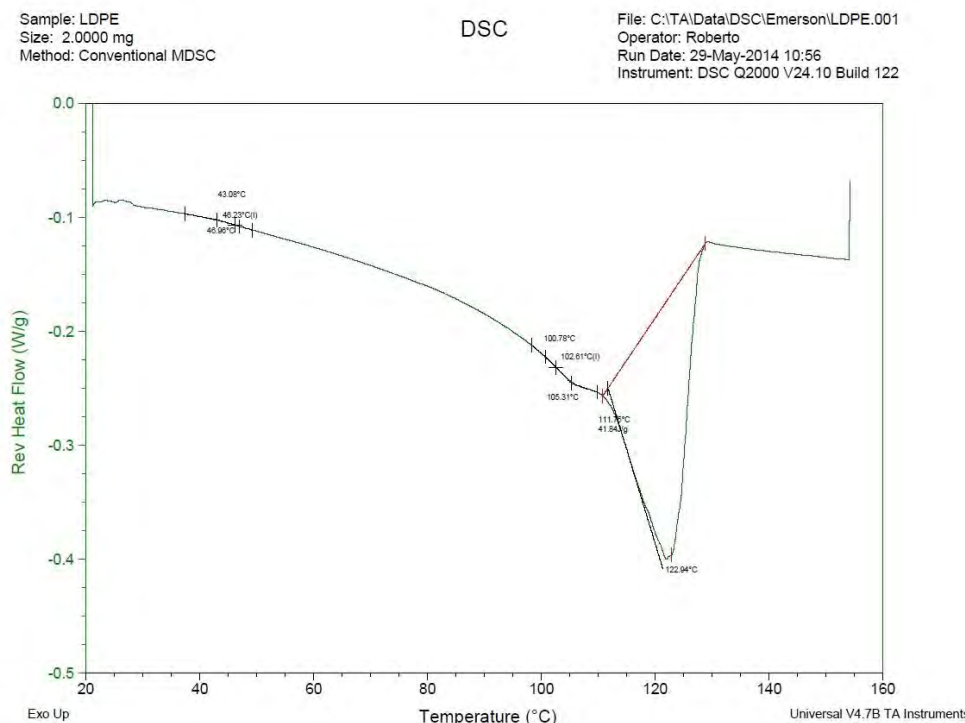
**Figura 4. Grafica estándar DSC para termoplásticos.**



#### 4.1 DSC PARA LDPE

Para el polietileno de baja densidad los resultados de la prueba de DSC se observan en la figura 5, en esta se observa una primera temperatura de transición vítrea a 46,23 °C, la segunda temperatura de transición vítrea a 102,61 °C, y el cambio de fase a 115 °C, a 111,95 °C se presenta una anomalía térmica, porque el polímero reciclado tiene impurezas o humedad que generan picos de transición no esperados. En el Anexo B se pueden observar los resultados detallados de DSC para este polímero. Si se comparan los resultados obtenidos en la prueba con los textos científicos se pueden observar algunas incongruencias, la primera temperatura de transición vítrea en los textos varía entre -130 a -100<sup>2</sup> °C, y una segunda temperatura de transición vítrea entre -30 a -10<sup>3</sup> °C, la cual no coincide con los resultados de DSC obtenidos, esto se debe a que los polímeros son reciclados, y presentan impurezas y humedad en entre sus moléculas. Sin embargo, la temperatura de fusión de acuerdo a la literatura oscila entre 100 y 115 °C siendo muy similar a los resultados obtenidos.

**Figura 5. DSC para Polietileno de baja densidad (LDPE).**



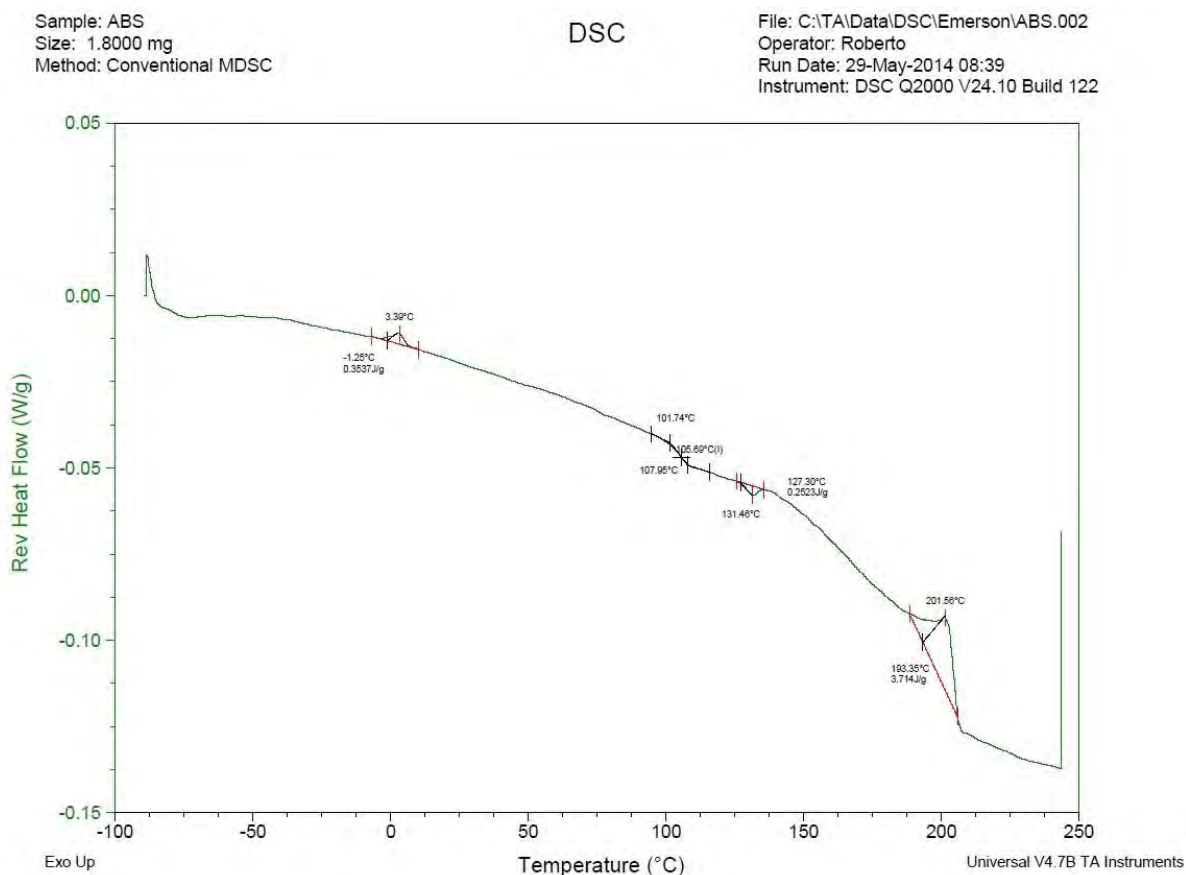
<sup>2</sup> Thermal Properties of Polymers. Selb [en línea]. NETZSCH, 2014 [consultado 22 de Agosto de 2014]. Disponible en Internet: <http://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/home.html>.

<sup>3</sup> Ibíd., p. 30.

## 4.2 DSC PARA ABS

Para el Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) los resultados de la prueba de DSC se observan en la figura 6, en ésta se observa una anomalía térmica a 3.39 °C, la temperatura de transición vítrea a 105,69 °C, la temperatura de cristalización a 131 °C, y por último un cambio de fase a 201 °C. En el Anexo B se pueden observar los resultados detallados de DSC para este polímero. Si se comparan los resultados obtenidos en la prueba con los textos científicos se puede observar que a diferencia del LDPE los resultados son similares, la temperatura de transición vítrea en los textos varía entre 105 a 125<sup>4</sup> °C, y la temperatura de fusión varía entre 190 y 215<sup>5</sup> °C.

**Figura 6. DSC para Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).**



<sup>4</sup> Ibíd., p. 30.

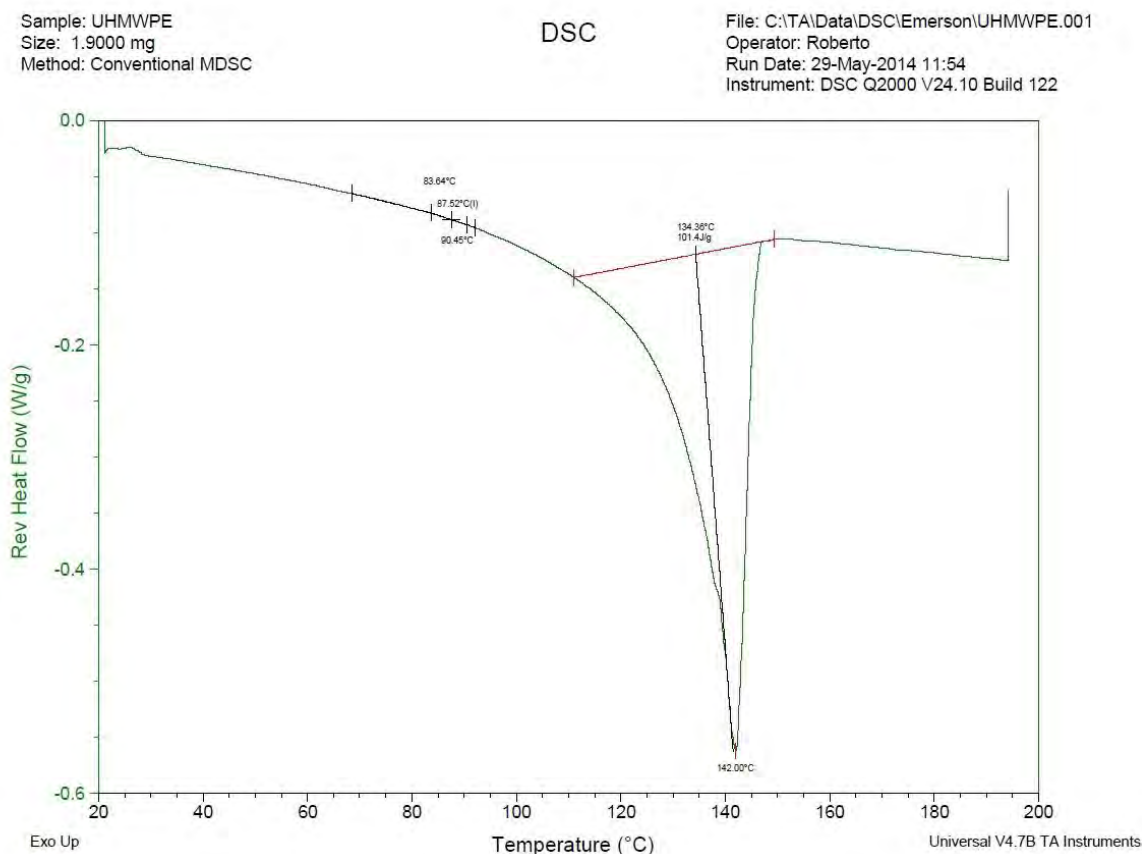
<sup>5</sup> Ibíd., p. 30.



### 4.3 DSC PARA UHMWPE

Para el UHMWPE los resultados de la prueba de DSC se observan en la figura 7, en esta se observa la temperatura de transición vítrea a 87.52 °C y un valle a 134 °C. En el Anexo B se puede observar en la tabla los resultados detallados de DSC para este polímero. Si se comparan los resultados obtenidos en la prueba con la literatura se pueden observar que la temperatura de transición vítrea varía entre -130 a -100<sup>6</sup> °C, lo cual difiere de los resultados de DSC obtenidos. Sin embargo la temperatura de fusión listada en la literatura (la cual varía entre 130 y 140<sup>7</sup> °C) es muy similar a los resultados obtenidos en el presente estudio.

**Figura 7. DSC para polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE).**



<sup>6</sup> Ibid., p. 30.

<sup>7</sup> Ibid., p. 30.

## 5. MOLIENDA DE LOS POLIMEROS RECICLADOS

El proceso de molienda del polímero consiste en pulverizar con discos las partículas del polímero, hasta llevarlo a un tamaño mínimo deseado, el cual está limitado por la holgura mínima entre los discos del molino (un disco es fijo y el otro móvil). En el presente estudio se pudo obtener un tamaño de partícula de aproximadamente  $150\text{ }\mu\text{m}$ , que se encuentra en el límite de tamaño de partícula manejado por el equipo de deposición. El proceso de pulverización fue llevado a cabo mediante el molino criogénico MODEL 25 AC LAB PULVERIZER (ver figura 8), el cual tiene un motor con una potencia máxima de 3 HP y una velocidad máxima de 3600 rpm.

**Figura 8. Molino criogénico MODEL 25 AC LAB PULVERIZER.**



## 5.1 POLIMERO RECICLADO

Los polímeros reciclados se obtuvieron gracias a la empresa DIMAPRO que aportó a la investigación el ABS, el LDPE, y el UHMW, estos polímeros venían triturados en forma de pellets alcanzaban un tamaño de partícula de 3 mm y eran reciclaje de material sobrante de moldes en procesos de inyección y termo formado.

## 5.2 MOLIENDA DE POLÍMEROS

Para que un polímero termoplástico pueda ser pulverizado, todos los enlaces de éste deben tener el nivel de energía necesario para no oponer resistencia a la molienda, de lo contrario el polímero en vez de ser pulverizado inmediatamente tratará de absorber energía para llegar primero al punto de transición vítrea, y posteriormente al de cristalización. El punto de transición vítrea es el punto donde el polímero absorbe la energía suficiente para romper los enlaces amorfos, y en la mayoría de los polímeros que tienen un porcentaje de enlaces cristalinos menor que el de los enlaces amorfos esto sería suficiente para ser pulverizados, sin embargo no es así, lo ideal para que un polímero pueda ser pulverizado es que alcance la temperatura de cristalización, este es el punto donde se rompen los enlaces cristalinos del polímero<sup>8</sup>.

En la primera prueba de molienda se utilizaron pellets de polietileno de baja densidad, el primer parámetro de operación para que el molino funcionara adecuadamente fue conectar la manguera de aire a presión, este molino puede trabajar con nitrógeno líquido en vez de aire a presión para la refrigeración durante la molienda pero no se disponía de sistema de enfriamiento por nitrógeno, se depositaron los pellets en la tolva (embudo) y se encendió el molino, para que los pellets empiecen a caer en el molino se debe variar la vibración de un resbalador, en una escala del 0 al 12, a medida que se aumenta la vibración del resbalador aumenta el caudal de pellets, en un principio se pensó que entre mayor caudal sería mucho mejor ya que se pulverizaría rápido el polímero, pero se descubrió que no salía la misma cantidad de polímero que la que entraba si el caudal era el máximo, además de esto el polietileno que salía estaba muy caliente, así que se abrió el molino y se encontró que casi todo el polietileno de baja densidad estaba pulverizado pero atascado alrededor de los discos del molino en trozos grandes, se llegó a la conclusión de que esto sucedía porque el caudal de pellets era mucho para ese sistema de enfriamiento y las partículas del polímero que

---

<sup>8</sup> ABRAMOVICH BERSHTEĬN Vladimir y MIHAJLOVI. EGOROV Viktor. Differential Scanning Calorimetry of Polymers. New York : Ellis Horwood, 1994. p. 253

entraban en contacto con las cuchillas del molino se calentaban al punto de fusionarse antes de ser refrigeradas por el aire comprimido, así que se disminuyó la vibración del resbalador de 12 a 0.5 y se limpió el molino por dentro.

Los parámetros apropiados para la operación de esta máquina según la experiencia con los diferentes polímeros que se utilizaron son, el regulador de vibración, este debe estar entre 0.5 y 1 en una escala del 0 al 12, el segundo parámetro fue la presión, esta debía estar en 120 psi que era el máximo, para que el tercer parámetro que es la temperatura dentro del molino se mantuviese en 37 °C, si la presión disminuye, la temperatura aumenta, y si el caudal aumenta la temperatura también, de no ser así el tamaño de partícula no sería el adecuado, se fusionaría el polímero o no lo pulverizaría, esto depende de que polímero sea. Otro parámetro importante es la distancia que hay entre los discos del molino, esta se midió con una galga de 1/64" o 0,4 mm que garantiza la distancia más próxima entre los discos que se podía medir sin que éstos se choquen, esta medida da el tamaño mínimo de partícula necesario que son 150 µm, la distancia mínima entre discos del molino criogénico es de 0,005", pero no se disponía de ningún instrumento que garantizara esta medida, y era peligroso intentarlo.

**5.2.1 Pulverización LDPE.** Durante el proceso de molienda, este polímero debe alcanzar una temperatura igual o cercana a la temperatura de cristalización para ser pulverizado, el LDPE tiene un amplio rango de transición vítrea entre -130 a -100 y -30 a -10 °C, y su temperatura de cristalización está entre 0 y 20 °C, a temperatura ambiente las cadenas amorfas y cristalinas del polímero están por encima de la transición vítrea y cristalización, por lo tanto pueden ser pulverizadas, en este caso el material fue pulverizado a temperatura ambiente sin ningún problema porque la temperatura ambiente está por encima de la temperatura de cristalización del polímero.

**5.2.2 Pulverización ABS.** Durante el proceso de molienda, este polímero debe alcanzar una temperatura igual o cercana a la temperatura de cristalización para ser pulverizado, el ABS tiene un rango de transición vítrea entre 95 y 105 °C, y su temperatura de cristalización está entre 110 y 130 °C, para pulverizar el ABS se llevó una muestra del mismo a un horno y se calentó hasta una temperatura de entre 110 y 140 °C, para después depositarlo en el molino manualmente, debido a que se perdía calor muy rápido y el rango de temperatura que se necesitaba para pulverizar el polímero era pequeño, se depositaban algunos pellets en el molino y se volvían a recalentar para que alcanzaran de nuevo la temperatura adecuada.

## **6. PROCESO DE TAMIZADO DEL POLIMERO PULVERIZADO**

El proceso de tamizado tiene como propósito garantizar que el tamaño de la partícula de los polímeros sea homogénea y de alrededor de 150  $\mu\text{m}$ , dado que la máquina de deposición electrostática lo requiere, para que el recubrimiento sea lo más uniforme posible y permita el flujo de las partículas a través de los canales de la pistola electrostática.

### **6.1 MÁQUINAS TAMIZADORAS**

El proceso de tamizado consiste en hacer pasar un material con partículas de diferentes tamaños por un tamiz o malla que separa las partículas, las partículas de menor tamaño pasan por los poros del tamiz atravesándolo y las grandes quedan atrapadas por el mismo.

Después de la primera prueba de molienda con el LDPE también se hizo una primer prueba de tamizado, con el tamiz vibratorio de la universidad, y se observó que pasaban muy pocas partículas del tamaño adecuado por el tamiz de 150  $\mu\text{m}$ , así que para obtener el tamaño de partícula deseado se pulverizó el polímero varias veces, hasta llegar a la conclusión que debía ser pulverizado al menos 5 veces más, esto no quiere decir que todo el polímero que salga tendrá el tamaño de partícula deseado, sino que la cantidad de polímero que tendrá el tamaño de partícula deseado sería mayor<sup>9</sup>.

---

\* Se observó que algunas partículas del polímero pulverizado se adherían a la tolva de salida, y se concluyó que esto sucedía debido a que la tolva se cargaba estáticamente, pero porque no se adherían todas la partículas, era porque solo se adherían las que la carga estática era capaz de atraer, ósea las más pequeñas, así que se recolecto aparte el polímero que se adhería a la tolva.

**6.1.1 Máquina agitadora de tamices.** Primero se intentó tamizar el polímero de prueba LDPE en el tamiz del laboratorio de materiales de la UAO, en la figura 9 se observa el tamiz, se introdujeron 200 gramos del polímero en un tamiz de 0,1 mm, se cerró el tamiz con una tapa para que no se derramase el polímero, y se ubicaron los demás tamices debajo de este, hasta llegar a un tamiz de 80  $\mu\text{m}$ , después se encendió el agitador y se dejó durante 5 minutos, se abrió el tamiz de 150  $\mu\text{m}$  y se pesó el polímero que había pasado hasta el tamiz de 80  $\mu\text{m}$ , se encontró que solo pasaron 2,89 gramos, menos del 2% del polímero inicial, esto implicaría depositar al menos 20 kg de LDPE pulverizado durante 9 horas seguidas para obtener 289 gramos de LDPE de 150  $\mu\text{m}$  que es la cantidad ideal para hacer la deposición electrostática de las 12 probetas. Adicionalmente, se encontró contaminación, ésto se debe a que el propósito que tiene este tamiz es separar partículas de arena verde para el proceso de fundición, se intentó descontaminar los tamices con aire a presión, pero no fue posible deshacerse de la arena apareció, y esta no solo implicaba contaminación sino que taponaba los tamices y evitaba que se obtuviese más polímero del tamaño adecuado, este proceso de tamizado se intentó con los otros 2 polímeros, y el resultado fue el mismo, así que se descartó.

**Figura 9. Tamiz del laboratorio de materiales de la UAO.**



**6.1.2 Tamizado manual.** Se fabricó un tamiz manual con un marco de 40 cm por 50 cm y con un tamiz de 150  $\mu\text{m}$  (ver figura 14), se tamizaron los polímeros de manera manual para ver si este proceso era más eficiente, se depositaron los mismos 200 gramos de LDPE que en el tamiz de laboratorio, y se sacudió el tamiz manualmente durante 2 minutos ya que el esfuerzo era grande y no se podía más tiempo, se hizo una pausa de 5 minutos, y se volvió a tamizar. Después de al menos 8 veces no se obtenían partículas de 150  $\mu\text{m}$  del polímero, el proceso de recolecta del polímero era incómodo y laborioso, después con una tarjeta plástica se agrupó el polímero tamizado y con otra se depositó en un recipiente, se obtenían entre 3 y 4 gramos después de este proceso, lo cual implicaba repetirlo 82 veces para obtener la cantidad necesaria para la deposición electrostática, después de terminar el tamizado se intentó descontaminar el tamiz con aire comprimido pero al igual que con la arena era difícil dejarlo totalmente descontaminado, así que este proceso se descartó.

**Figura 10. Tamiz manual.**



**6.1.3 Máquina tamizadora polinizadora.** Se fabricó una máquina tamizadora polinizadora (ver figura 11 a), b) y c)), como su nombre lo indica el propósito es extraer el polen de las flores, se utilizó un tamiz de 150  $\mu\text{m}$  y dos tapas de madera, una de estas tapas tenía un agujero que sella con cauchos y es por donde se deposita el polímero, este tamiz se introdujo en una caja de juguetes y con un motor de 12 voltios y un piñón en su eje se asentó en el borde de una de las tapas

de madera, así una vez se encendía el motor el tamiz comienza a dar vueltas a una velocidad aproximada de 5 rpm, esto genera que el polímero dentro del tamiz suba entre 70 y 80 grados y después se descuelgue, el motor no debe girar muy rápido porque el tamiz no funciona como una centrifuga, sino como un tamiz manual, se depositaron 400 gramos de LDPE y se dejó girando el tamiz durante 20 minutos, la cantidad que se obtuvo no fue mucha más que en los anteriores equipos, así que se dejó durante 1 hora, y esta vez se obtuvo una cantidad de 20 gramos. El material recolectado no era mucho, pero el proceso era más simple ya que solo se depositaba una mayor cantidad del polímero y se encendía el motor, en cuanto al método de recolección era más sencillo porque solo se inclinaba la caja y el polímero caía en el recipiente, así que éste fue el método que se utilizó para tamizar todos los polímeros.

**Figura 11. Tamizadora polinizadora.**



## **6.2 MEDICIÓN TAMAÑO DE PARTICULA MEDIANTE SEM**

Con el fin de analizar la morfología de las partículas después del proceso de molienda se realizó un análisis mediante microscopia electrónica de barrido (SEM), en ésta se puede observar el tamaño promedio de las partículas en una muestra aleatoria.

Las pruebas de microscopía electrónica de barrido fueron desarrolladas utilizando un equipo JSM-6060LV, este instrumento usa un voltaje de aceleración de 0.5-30 kV y una corriente de probeta de 1 pA a ~1000nA (ver figura 12), éste utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen, produce imágenes de alta resolución, de forma que las características superficiales de la muestra pueden ser examinadas con gran amplificación. La preparación de las muestras es relativamente fácil ya que la mayoría de los SEM sólo requieren que



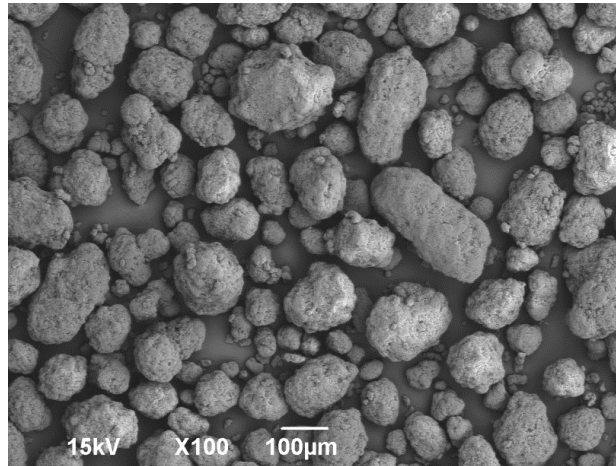
éstas sean conductoras, en el caso de estos polímeros que no son conductores eléctricos se recubrieron con una capa delgada de oro para conferirle carácter conductor. el recubrimiento se hace mediante pulverización catódica (Sputtering), posteriormente, se barrió la superficie con electrones acelerados que viajan a través del cañón, un detector formado por lentes basadas en electroimanes, mide la cantidad e intensidad de electrones que devuelve la muestra, siendo capaz de mostrar figuras en tres dimensiones mediante imagen digital. Su resolución puede llegar a ser entre 4 y 20 nm.

**Figura 12. SEM JSM-6060LV.**



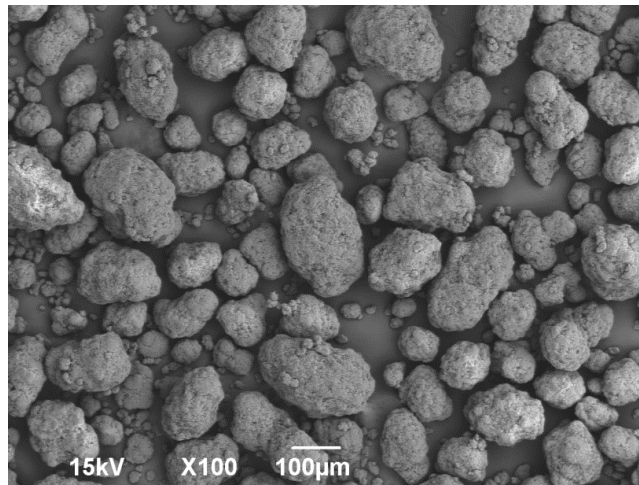
En la figura 13 se puede observar el tamaño de partículas de una muestra del UHMWPE pulverizado, Según la regleta de referencia de la imagen hay 138 partículas menores y 20 mayores a 100  $\mu\text{m}$ , lo cual es un porcentaje del 88% menor a 100  $\mu\text{m}$ , en un promedio de las 4 muestras tomadas, se obtuvo el 90% de las partículas con un tamaño menor de 100  $\mu\text{m}$ .

**Figura 13. SEM UHMWPE.**



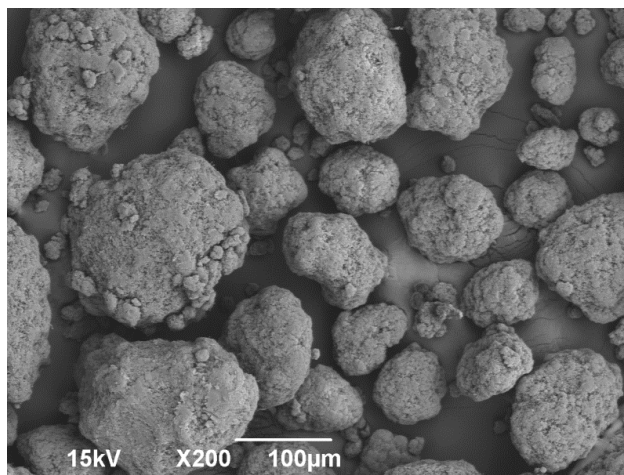
En la figura 14 se puede observar el tamaño de partículas de una muestra del ABS pulverizado, de acuerdo a las mediciones hay 105 partículas menores y 34 mayores a 100 µm, lo cual es un porcentaje del 75 % menor a 100 µm, en un promedio de las 4 muestras tomadas, se obtuvo el 72 % de las partículas con un tamaño menor de 100 µm.

**Figura 14. SEM ABS.**



En la figura 15 se puede observar el tamaño de partículas de una muestra del LDPE pulverizado, las mediciones muestran que el 66 % de las partículas tiene un tamaño menor a 100 µm, en un promedio de las 4 muestras tomadas, se obtuvo el 61 % de las partículas con un tamaño menor de 100 µm.

**Figura 15. SEM LDPE.**



## **7. DEPOSICIÓN ELECTROSTÁTICA DE LOS POLÍMEROS**

### **7.1 PREPARACIÓN DE PROBETAS PARA LA DEPOSICIÓN DEL POLÍMERO**

Para garantizar la homogeneidad en la deposición electrostática, la limpieza de las probetas debe ser homogénea, ya que al tener la más pequeña contaminación en la superficie se puede ver afectado el anclaje entre el recubrimiento polimérico y el sustrato, en este sentido se utilizó un limpiador ultrasónico (ver figura 16). Durante este proceso, primero se llenó el recipiente metálico con agua, se limpió cada una de las probetas con agua y se secó, después se llenó un beaker más pequeño con alcohol etílico y se depositó en el recipiente metálico, sin que los 2 fluidos se mezclaran, se introdujo la probeta en el beaker con alcohol y se encendió el limpiador a una frecuencia de 60 Hz durante 4 minutos, posteriormente se retiró la probeta con unas pinzas y se dejó secar.

**Figura 16. Limpiador ultrasónico.**



### **7.2 PROCESO DE ROCIADO ELECTROSTÁTICO**

La deposición electrostática consiste en depositar partículas cargadas estáticamente en superficies conductoras, en este caso polímeros sobre metales, el material a depositar debe ser un aislante eléctrico para poder cargarse estáticamente, además debe ser muy pequeño para no atascarse en la tubería del equipo, y para poder ser atraído por el conductor eléctrico que tiene un polo a tierra, a fin de que el polímero cargado se adhiera a la superficie objetivo.

La deposición de los recubrimientos se realizó mediante el equipo OPTIFLEX 2 L (ver figura 17) fabricado por ITW GEMA empresa pionera y líder a nivel mundial en equipos de alta precisión para aplicación de pintura en polvo electrostática. El sistema cuenta con los siguientes accesorios:

- Unidad de control con gabinete metálico retráctil, cable de conexión a la red a 110/220/330 V, con porta pistola.
- Válvula para la presión del aire de fluidificación, montada en el gabinete.
- Inyector de polvo ultra eficiente que permite un eficiente transporte de polvo, reduciendo el consumo de aire y la pérdida de polvo.
- Pistola manual pulverizadora de peso ligero y ergonómica, para mejor equilibrio en las manos y sujeción cómoda. Control Remoto que ofrece la flexibilidad necesaria para ajustar los parámetros sin alejarse del sitio de trabajo.
- Mangueras de impulsión, aire adicional, aire de fluidificación, y atomización.
- Un tanque, con capacidad de 5 kg de polvo.

En este tipo de equipos la corriente es una medida de indicación de cuanta carga eléctrica se mueve del electrodo de la pistola a la mezcla aire/polvo polimérico que sale de la boquilla, esta medida también aplica al sustrato a recubrir. La pistola debe ser acondicionada con el máximo valor posible de voltaje (kV) debido a que un valor más alto de voltaje genera un potencial más alto para cargar las partículas de polvo polimérico, generando una mayor eficiencia en la transferencia de material.

**Figura 17. Máquina de deposición electrostática.**



## 8. PROCESO DE CURADO DE LAS PROBETAS

Una vez las probetas fueron recubiertas con partículas de los polímeros, el paso siguiente fue curar el polímero sobre las probetas para crear un anclaje entre el polímero y éstas. Para tal fin se utilizó un horno casero y una termocupla para sensar con mayor precisión la temperatura al interior de este.

Las probetas deben introducirse al horno en forma horizontal. Para que el calor sea distribuido lo más uniformemente posible (ver figura 18), ya que al introducirse verticalmente las probetas de adelante perderán calor con mayor facilidad que las de atrás y la gravedad hace que el polímero al fundirse caiga y no se adhiera sobre las probetas.

**Figura 18. Manera adecuada de introducir las probetas al horno.**



### 8.1 DESHIDRATACIÓN DE POLÍMEROS

Los polímeros deben ser deshidratados porque la humedad puede ser un factor aglomerador, para deshidratar los polímeros primero se descontaminó el horno, después se introdujeron al horno los recipientes con los polímeros pulverizados sin tapa, se elevó la temperatura del horno entre 100 y 105 °C (temperatura de evaporación del agua), y se dejó durante 12 horas, por último se dejó enfriar el polímero durante el mismo lapso de tiempo al interior del horno.

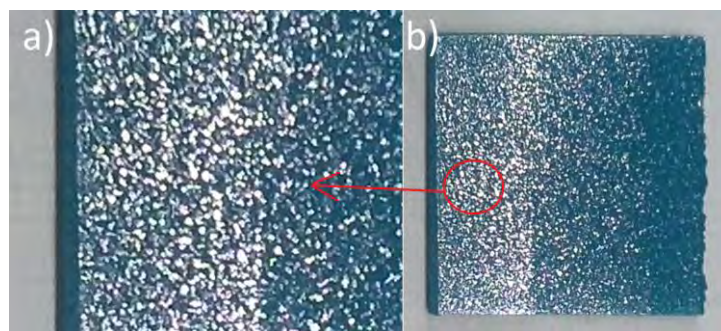
## 8.2 CURADO DE LAS PROBETAS DE LDPE

Una vez adherido estáticamente el LDPE a las probetas, se introdujeron al horno a una temperatura entre 110 y 125°C, durante 20 minutos, el recubrimiento presentó mucha porosidad la cual se puede convertir en concentrador de esfuerzos para romper el anclaje entre el polímero y la superficie durante la prueba de pin-on-disk, y aumentar el factor de corrosión, una posible causa de esta porosidad es que al ser un material reciclado, este tiene contaminación que durante la fundición del polímero actúa como factor aglomerador, así que para descartar esta posibilidad se deshidrató el polímero en el horno, y de nuevo se depositó el recubrimiento, y se encontró que aún así el recubrimiento era poroso. Se aplicaron tres capas para que la probeta quedara recubierta de LDPE.

## 8.3 CURADO DE LAS PROBETAS CON ABS

Las probetas recubiertas con ABS pulverizado se introdujeron al horno durante 40 minutos a una temperatura de entre 190 y 208 °C, se retiraron y se encontró que las probetas presentaban porosidad (ver figura 19 a) y b)), de la misma manera que el LDPE se hizo un recubrimiento adicional y se hornearon las probetas a la misma temperatura durante el mismo tiempo, se encontró que estas aún presentaba algunos poros (ver figura 20), así que se hizo un tercer recubrimiento con el cual ya no presentaron poros (ver figura 21 a) y b)).

**Figura 19. Probeta recubierta con una capa de ABS.**

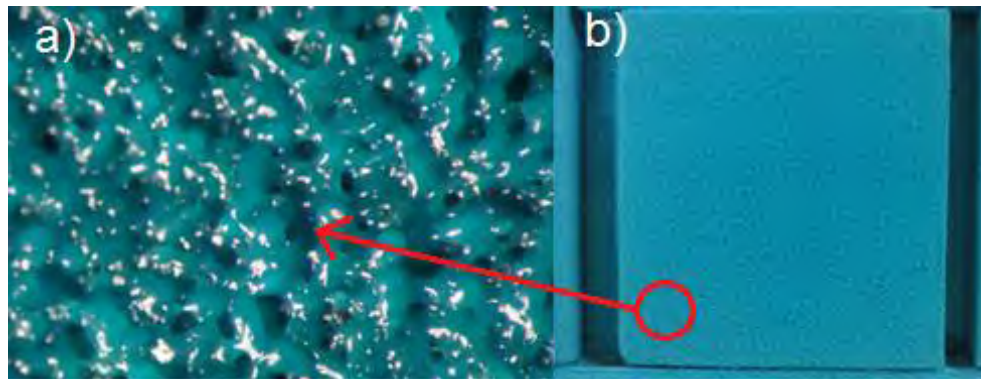




**Figura 20. Probeta recubierta con dos capas de ABS.**



**Figura 21. Probeta recubierta con tres capas de ABS.**



#### **8.4 CURADO DE LAS PROBETAS CON UHMWPE**

Las probetas recubiertas con UHMWPE pulverizado, se llevaron al horno, gracias a las experiencias con los anteriores polímeros sobre la temperatura adecuada para generar el anclaje entre el polímero y la probeta, en este caso se elevó la temperatura del horno hasta la temperatura de fusión del UHMWPE, entre 126 y 138 °C, durante 40 minutos, se retiraron las probetas y se encontró que este polímero no tenía porosidades.

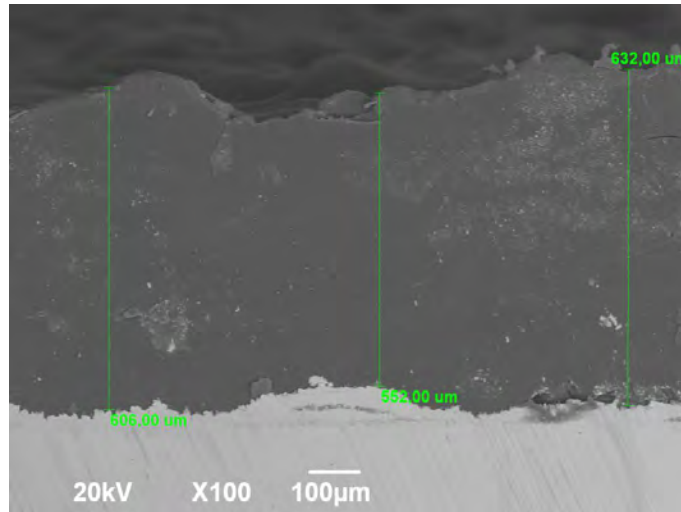
#### **8.5 MEDICIÓN DEL ESPESOR DE LOS RECUBRIMIENTOS**

El espesor de los recubrimientos con tres capas de ABS se midió usando SEM, para esto se tomaron 6 muestras aleatorias sobre la superficie de las probetas, y se estableció que su valor promedio fue de 580  $\mu\text{m}$ , en la figura 22 a), b), y c) se



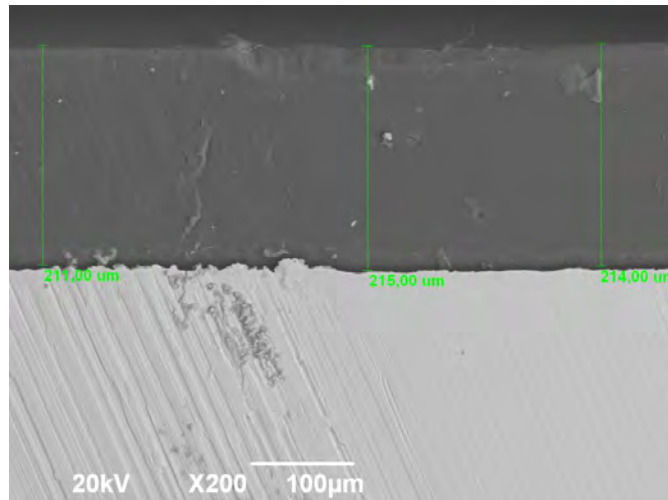
pueden observar las mediciones realizadas y comprobar que el espesor del recubrimiento es aproximadamente uniforme.

**Figura 22. Espesor de recubrimiento con 3 capas de ABS.**



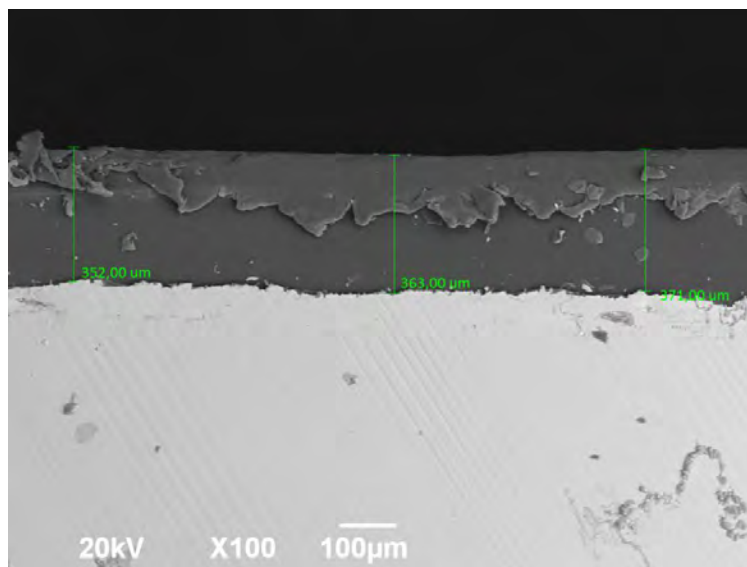
Se midió el espesor del recubrimiento con una capa de UHMWPE, y de la misma manera que el ABS se tomaron 6 muestras aleatoriamente sobre la superficie de las probetas, para calcular el promedio del espesor, que fue de 213 μm, en la figura 23 a), b), y c) se puede observar.

**Figura 23. Espesor de recubrimiento con 1 capa de UHMWPE.**



Finalmente, para el espesor del recubrimiento de tres capas de LDPE, se obtuvo un promedio del espesor de 349  $\mu\text{m}$  (ver figura 24 a), b), y c)).

**Figura 24. Espesor de recubrimiento con 3 capas de LDPE.**



## 9. ENSAYOS DE PIN-ON-DISK

La máquina de pin-on-disk microtest (ver figura 25) se utilizó para determinar el coeficiente de fricción que existe entre 2 materiales, la prueba consiste en aplicar una carga normal constante ( $w$ ) sobre un par tribológico mientras este gira a una velocidad angular constante. A partir de estos parámetros y con base en el tiempo durante el cual se realiza el ensayo y la distancia radial desde el centro del disco hasta el punto de contacto, se puede calcular la distancia de deslizamiento entre el pin y el disco. La carga normal durante la prueba es controlada mediante pesos calibrados y el coeficiente de fricción es obtenido mediante la medición de la fuerza de fricción usando un transductor de fuerza triaxial y la ecuación 1. Al final de la prueba se puede determinar el desgaste mediante la pérdida de masa del material más blando (regularmente el disco)

$$\mu = \frac{F_{lateral}}{W} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$\mu$  = Coeficiente de fricción

$F_{lateral}$  = Fuerza lateral

$w$  = Carga normal

**Figura 25. Máquina para prueba de pin-on-disk.**



Para todas las probetas los parámetros de operación fueron los mismos, el par tribológico lo conforman el metal recubierto con polímero y un balín de acero al cromo AISI 52 (1.3 % a 1.65 % cromo), la distancia que recorrió la probeta fue de 2000 metros, la velocidad angular 200 rpm, el radio de giro del balín sobre la probeta 20 mm, y el tiempo estimado de la prueba fue de 1 hora y 20 minutos.

## 9.1 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE PIN-ON-DISK

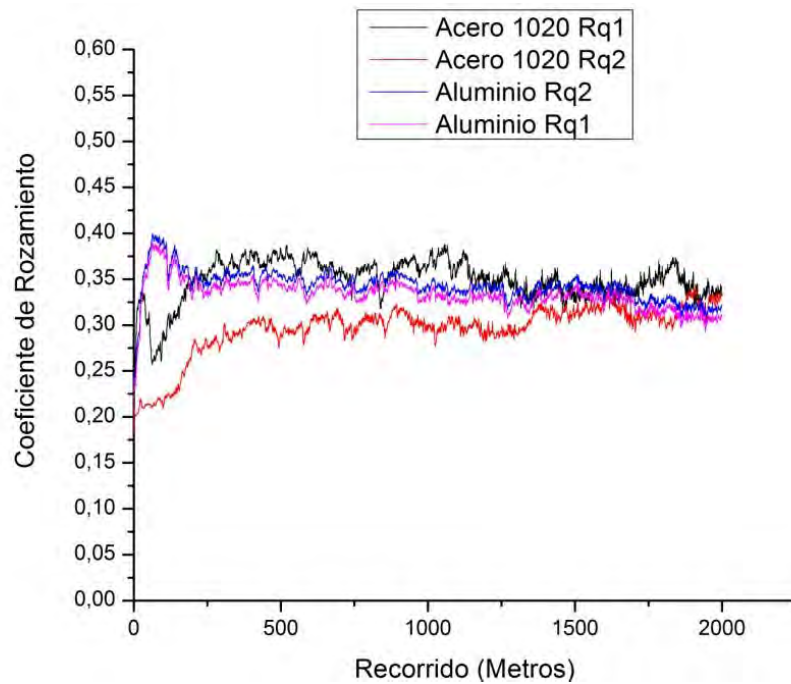
Para determinar el coeficiente de fricción del recubrimiento se calculó el promedio del mismo después de 500 metros de recorrido, esta distancia corresponde al periodo de limadura de asperezas (running-in), en el cual las asperezas superficiales del disco se deforman plásticamente hasta que las superficies en contacto pueden distribuir la carga normal uniformemente. Finalmente<sup>10</sup>, se calculó un promedio entre los 4 ensayos que se hicieron en cada tipo de prueba. En el Anexo C se encuentran los resultados de los coeficientes de fricción de todas las pruebas con la desviación estándar y pérdida de masa del recubrimiento.

**9.1.1 Resultados para el ABS.** En la prueba de pin-on-disk del ABS a 10N se encontró que el promedio del coeficiente de fricción dinámico fue de 0,32 (ver figura 26), y que en todas las probetas el balín dejó una pista pronunciada siendo penetrado el recubrimiento (ver figura 27 a) y b)). Sin embargo, a pesar de que el recubrimiento fue penetrado, no se observó un incremento significativo en el coeficiente de fricción, este fenómeno se atribuye a la presencia de terceros cuerpos, transferidos del recubrimiento hacia la superficie del pin, el cual al quedar atrapado entre los pares tribológicos, no genera un incremento adicional en el coeficiente de fricción, dado que el contacto final fue de polímero contra polímero.

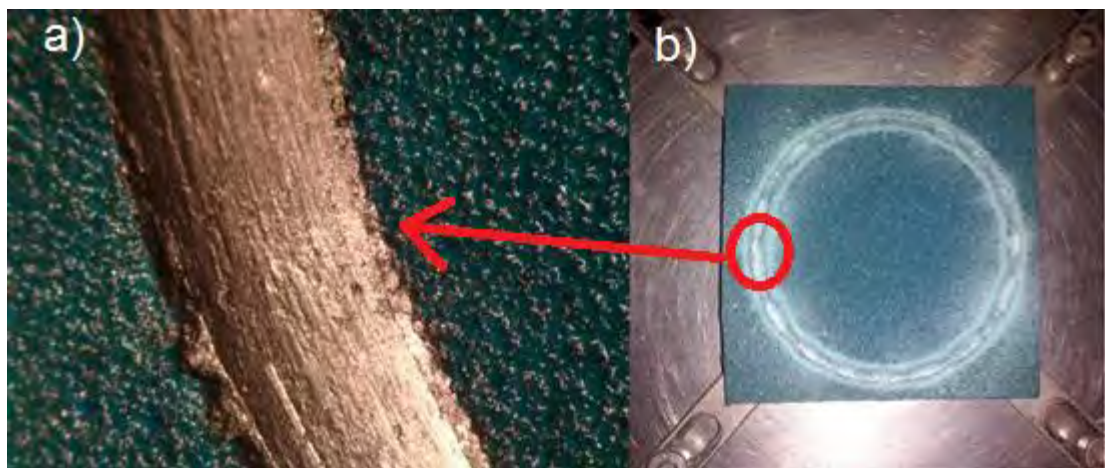
---

<sup>10</sup> ESCOBAR NUÑEZ Emerson, DEMAS Nicholaos, POLYCHRONOPOULOU Kyriaki, POLYCARPOU Andreas A.. Comparative scuffing performance and chemical analysis of metallic surfaces for air-conditioning compressors in the presence of environmentally friendly CO<sub>2</sub> refrigerant. En: Wear, 2010, vol. 268, p. 668–676.

**Figura 26. Gráfica de los 4 resultados de coeficiente de fricción vs recorrido, para una carga aplicada de 10N.**

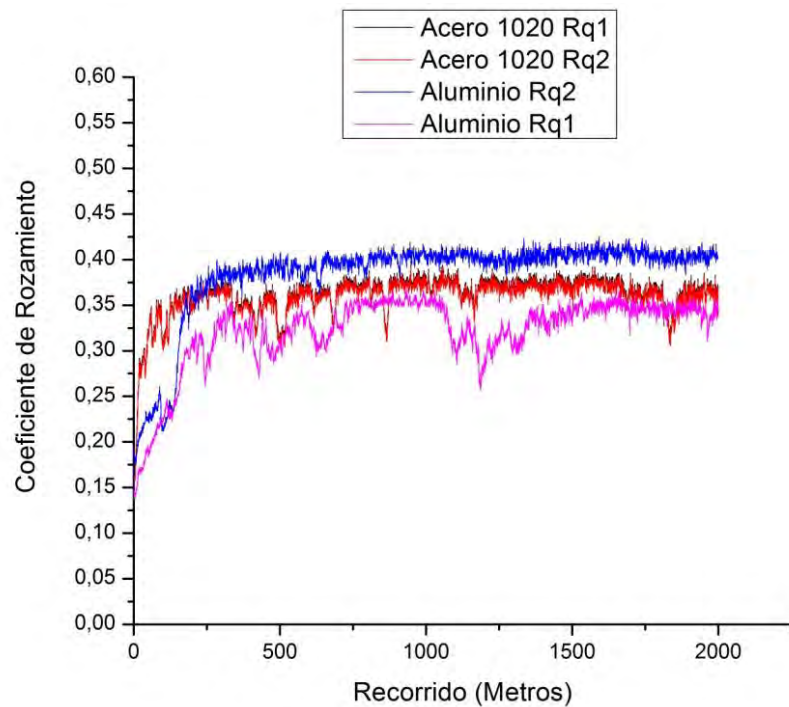


**Figura 27. Micrografía de la huella de desgaste de la probeta con recubrimiento de ABS después de prueba de pin-on-disk con 10N.**

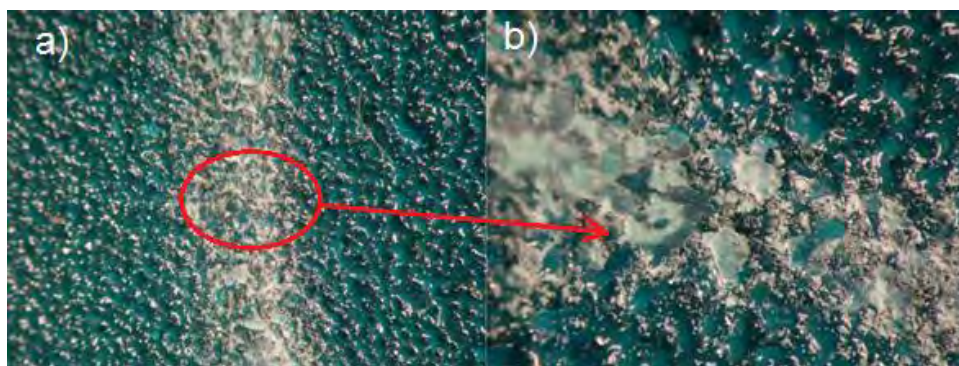


El análisis de la prueba de pin-on-disk del ABS a 2N mostró que el promedio del coeficiente de fricción dinámico fue de 0,35 (ver figura 28), y que en todas las probetas el balón dejó una pista poco pronunciada y no penetró el sustrato (ver figura 29 a) y b)).

**Figura 28. Gráfica de los 4 resultados de coeficiente de fricción vs recorrido, para una carga aplicada de 2N.**



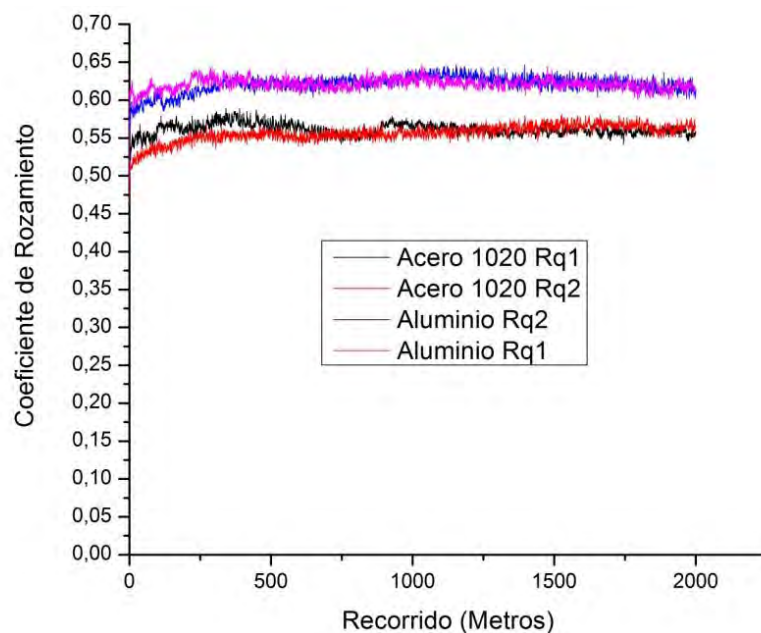
**Figura 29. Micrografía de la huella de desgaste de la Probeta con recubrimiento de ABS después de prueba de pin-on-disk con 2N.**



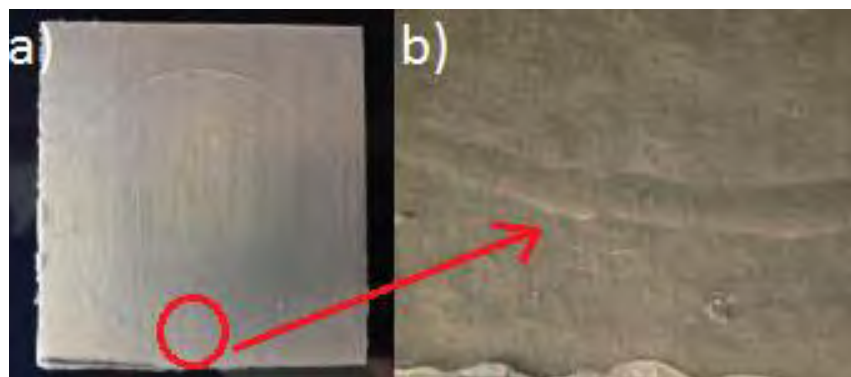


**9.1.2 Resultados para el UHMWPE.** Los resultados de la prueba de pin on disk para el UHMWPE a 2N se encontró que el promedio del coeficiente de fricción dinámico fue de 0,57 (ver figura 30). Adicionalmente, se puede observar que las pruebas son repetibles, pues el coeficiente de fricción no se incrementa para la misma carga normal y diferentes valores de rugosidad superficial del substrato. En la figura 31 se observa que el balín dejó una pista poco pronunciada sobre la probeta.

**Figura 30. Grafica de los 4 resultados de coeficiente de fricción vs recorrido, para una carga aplicada de 2N.**

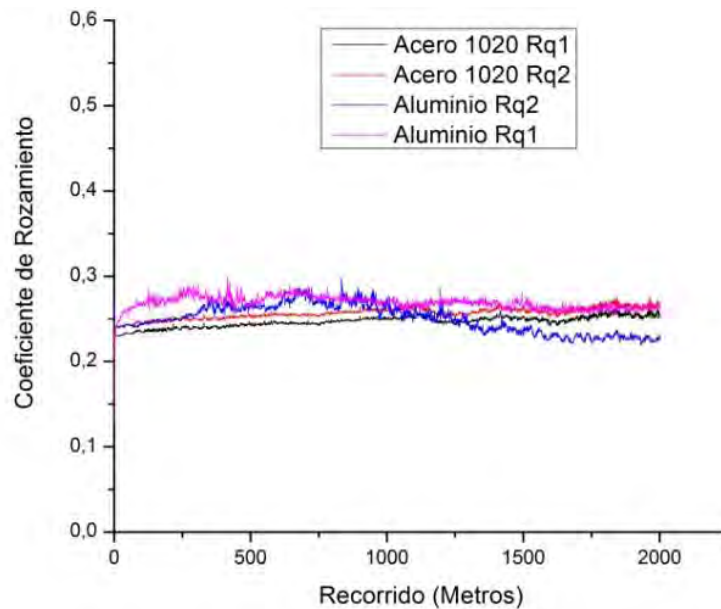


**Figura 31. Micrografía de la huella de desgaste de la Probeta con recubrimiento de UHMWPE después de prueba de pin-on-disk con 2N.**

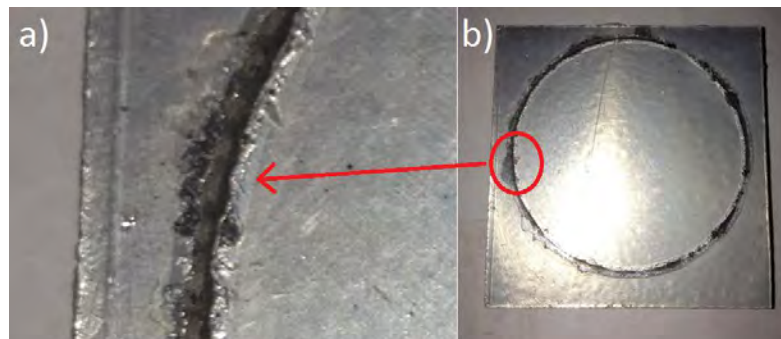


En la prueba de pin-on-disk del UHMWPE a 10N, se encontró que el promedio del coeficiente de fricción dinámico fue de 0,24 (ver figura 32), y que en todas las probetas el balín dejó una pista pronunciada que penetró el sustrato (ver figura 33 a) y b)). Sin embargo, fue posible observar que el coeficiente de fricción no aumentó, en la figura 32 se observa constante, y esto se debe a que a pesar de penetrar el recubrimiento, el polímero aún se encontraba en la superficie del balín y el metal base haciendo que el par tribológico fuese polímero contra polímero, prueba de ello es que en la figura 33 no hay rasgos de desgaste adhesivo en la superficie del disco.

**Figura 32. Gráfica de los 4 resultados de coeficiente de fricción vs recorrido, para una carga aplicada de 10N.**



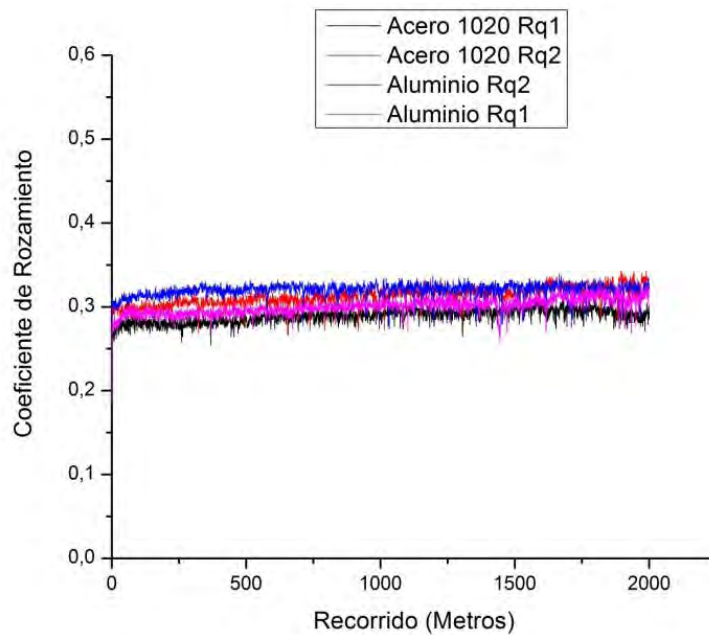
**Figura 33. Micrografía de la huella de desgaste de la Probeta con recubrimiento de UHMWPE después de prueba de pin-on-disk con 10N.**



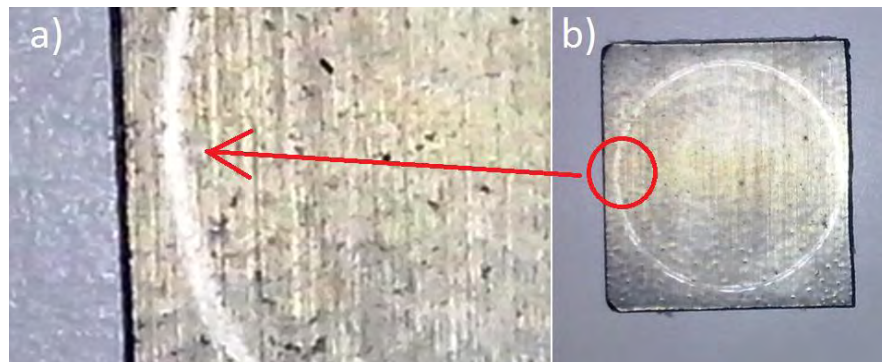


**9.1.3 Resultados para el LDPE.** En la prueba de pin-on-disk del LDPE a 2N se encontró que el promedio del coeficiente de fricción fue de 0,3 (ver figura 34), y que en todas las probetas el balón no penetró el recubrimiento (ver figura 35 a) y b)), también se observó que inmediatamente se dió inicio a la prueba el polímero se delaminó, observándose una burbuja entre éste y el sustrato. Sin embargo, en las aristas de la probeta aún estaba unido el polímero con el sustrato.

**Figura 34. Gráfica de los 4 resultados de coeficiente de fricción VS recorrido, para una carga aplicada de 2N.**

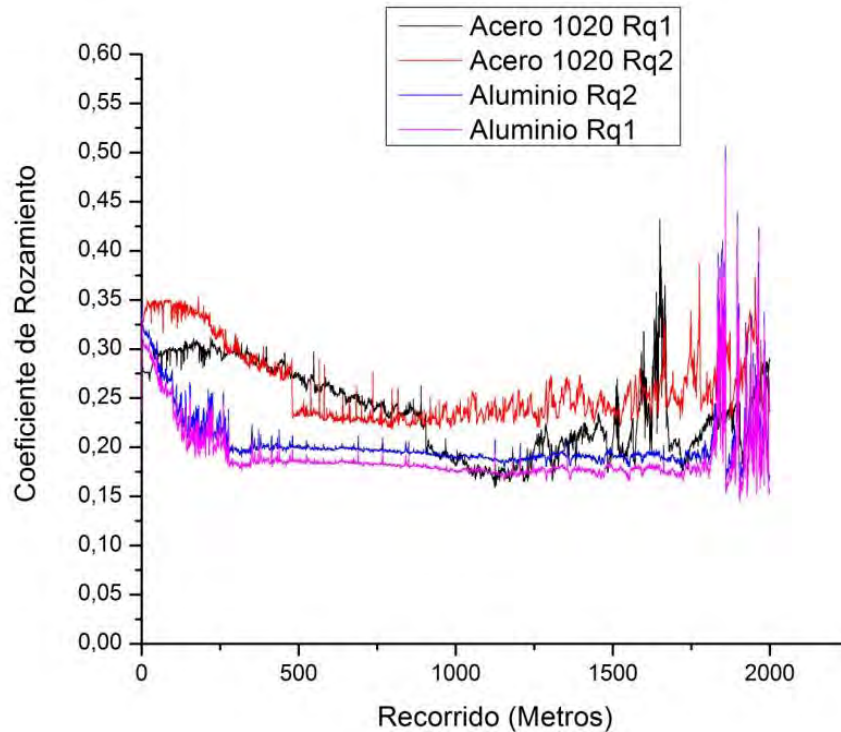


**Figura 35. Micrografía de la huella de desgaste de la Probeta con recubrimiento de LDPE después de prueba de pin-on-disk con 2N.**

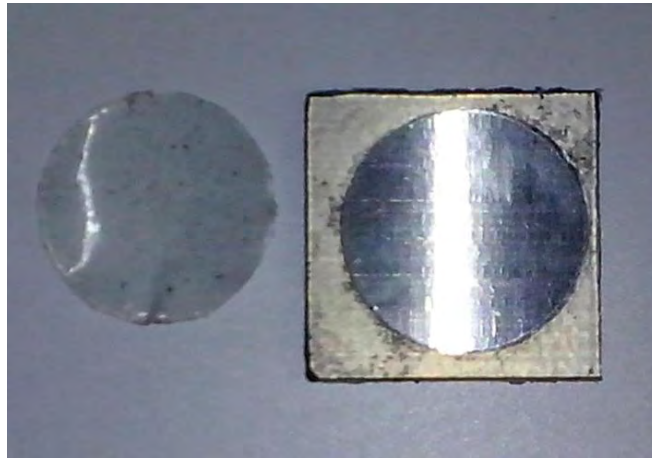


En la prueba de pin on disk del LDPE a 10N se encontró que el promedio del coeficiente de fricción fue de 0,23 (ver figura 36), y que en todas las probetas el balín dejó una pista pronunciada sobre el sustrato, además se delaminó el polímero de la superficie hasta el punto de cortarlo (ver figura 37).

**Figura 36. Gráfica de los 4 resultados de coeficiente de fricción VS recorrido, para una carga aplicada de 10N.**



**Figura 37. Probeta con recubrimiento de LDPE después de prueba de pin on disk.**



Si se comparan los resultados de todas las gráficas, hay patrones que se repiten. De hecho en la prueba de pin on disk con carga de 2N, se obtuvo un coeficiente de fricción mayor que para la carga de 10N, esto ocurre porque a mayor carga hay mayor desprendimiento del polímero ecuación 2, y el par tribológico no sería el acero del pin contra el polímero, si no los terceros cuerpos generados por el desgaste contra polímero, ya que a las asperezas superficiales con mayores picos del acero, se les transfiere el polímero que se desprendió.

$$w = K \frac{W}{H} \quad \text{Ecuación (2)}$$

w: desgaste (mm<sup>3</sup>)

W: carga normal

H: dureza del material más blando

K: coeficiente de desgaste

## 10. NANOINDENTACIÓN

Las pruebas de nanoindentación, fue desarrollada utilizando el Triboindentador TI950 de Hysitron (ver figura 38). Este instrumento ha sido desarrollado para que realice trabajos de caracterización nanomecánica con una gran precisión. Adicionalmente, este instrumento permite una caracterización cuantitativa y con alta confiabilidad a temperaturas hasta 800 °C, con la posibilidad de probar hasta 6 probetas diferentes a la vez.

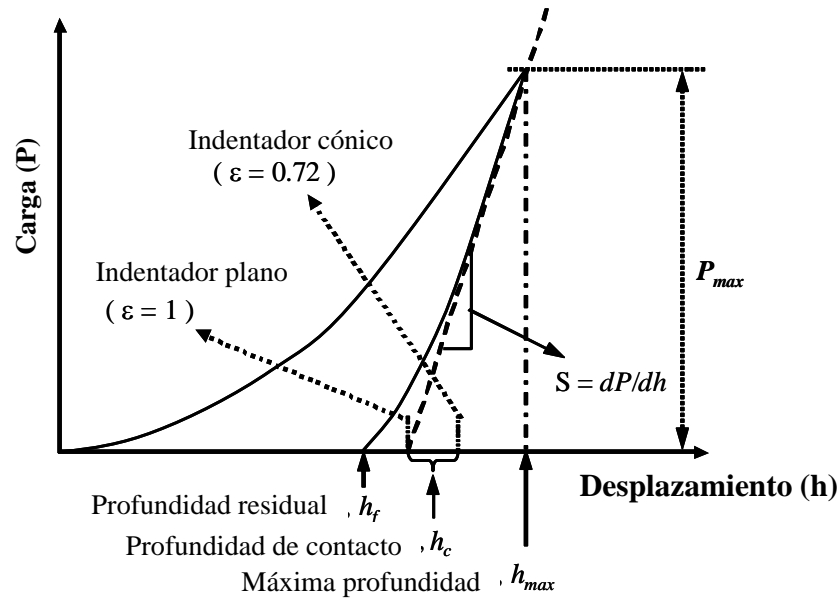
**Figura 38. Triboindentador TI950 (Hysitron).**



Fuente: TI 950 TriboIndenter. [En línea]. HYSITRON, 2015 [consultado 30 de Agosto de 2014]. Disponible en Internet: <http://www.hysitron.com/products/ti-series/ti-950-triboindenter>

En la técnica de nanoindentación, se utilizan los datos de carga-desplazamiento durante un ciclo completo de carga y descarga del indentador. La figura 39 muestra una curva típica de carga-desplazamiento durante una indentación, durante un ciclo de carga parámetros típicos como la carga normal ( $P$ ), la profundidad de indentación ( $h$ ), la máxima profundidad  $h_{\text{máx}}$ , la profundidad de contacto  $h_c$  (la distancia vertical a lo largo de la cual se realiza el contacto), la profundidad residual  $h_f$  y la rigidez  $dP/dh$ .

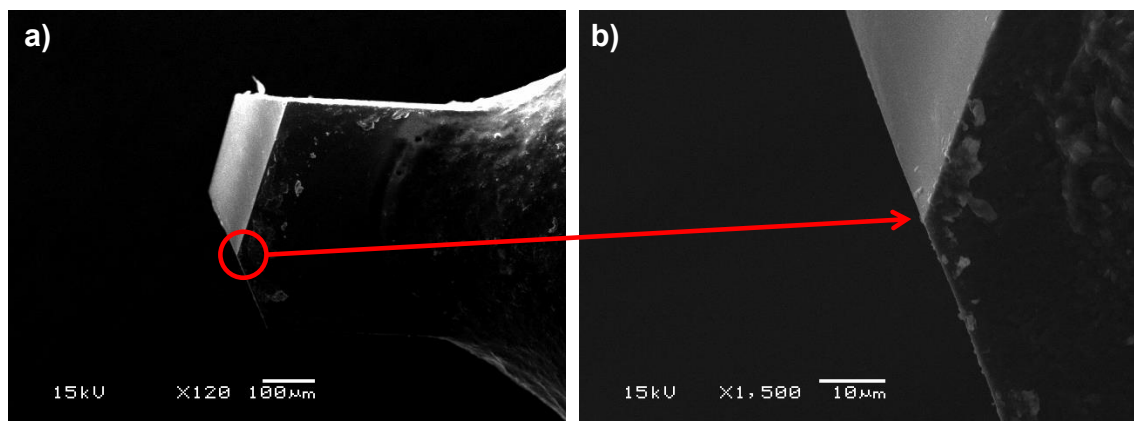
**Figura 39. Representación esquemática de la curva de carga y descarga generada durante un experimento de nanoindentación, la figura indica parámetros claves necesarios para el análisis.**



Fuente: Nanoindentation. [En línea]. Research Center for Non Destructive Testing GmbH (RECENDT), 2015 [consultado 15 de Octubre de 2014]. Disponible en Internet: [http://www.recendt.at/58\\_ENG\\_HTML.php?g\\_currMenuName=58](http://www.recendt.at/58_ENG_HTML.php?g_currMenuName=58).

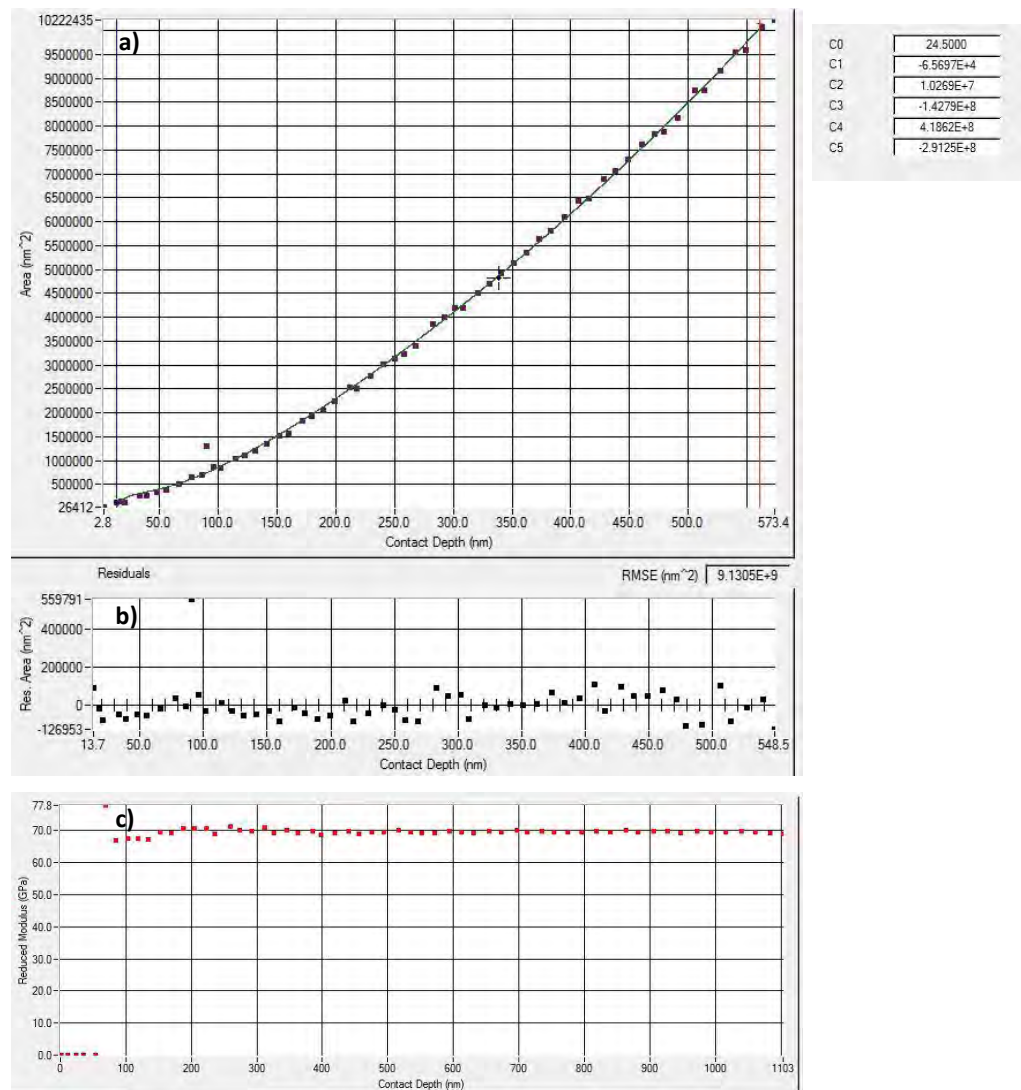
La geometría de la punta de Berkovich utilizada durante el presente estudio, se muestra en la figura 40 a) y b). Esta punta tiene un ángulo entre caras de  $143^\circ$  y un radio de curvatura de 200 nm.

**Figura 40. SEM de la punta Berkovich; a) x120, b) x1500.**



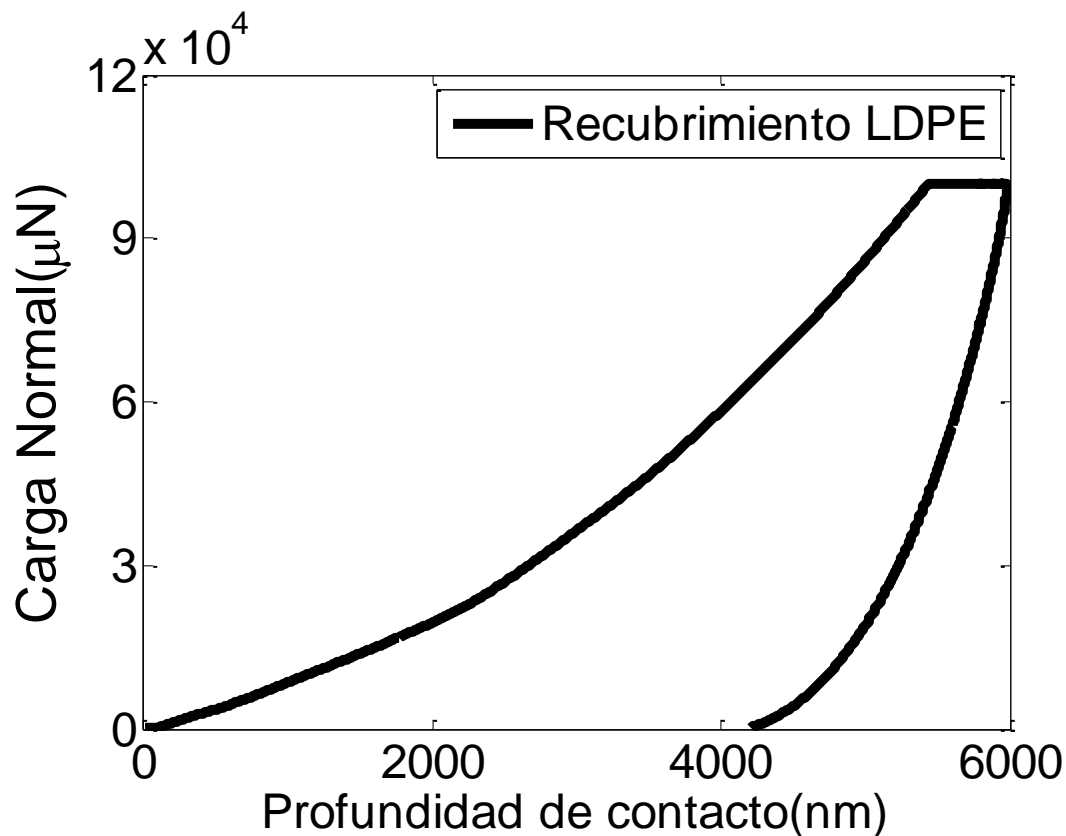
Los parámetros de calibración utilizados durante las pruebas de nanoindentación se muestran en la figura 41a) y b). Como puede observarse en esta figura, la calibración de la muestra (que en este caso fue cuarzo) logra pasar por la mayoría de los puntos experimentales del área residual, a fin de obtener los coeficientes utilizados en el modelo matemático de calibración. El módulo de elasticidad reducido se muestra en la figura 41c) en donde se puede ver que el valor promedio del módulo de elasticidad reducido para el cuarzo fue de aproximadamente 70 GPa.

**Figura 41. Área de calibración del cuarzo usado durante nanoindentación.**



Una vez se obtuvo la curva de calibración para el cuarzo, se procedió a realizar las pruebas para los diferentes polímeros bajo estudio. La figura 42 muestra la curva trapezoidal de carga para LDPE en la cual la carga normal se sostuvo durante 10 s con el fin de evitar el fenómeno de creep durante la prueba y evitar su efecto en las mediciones.

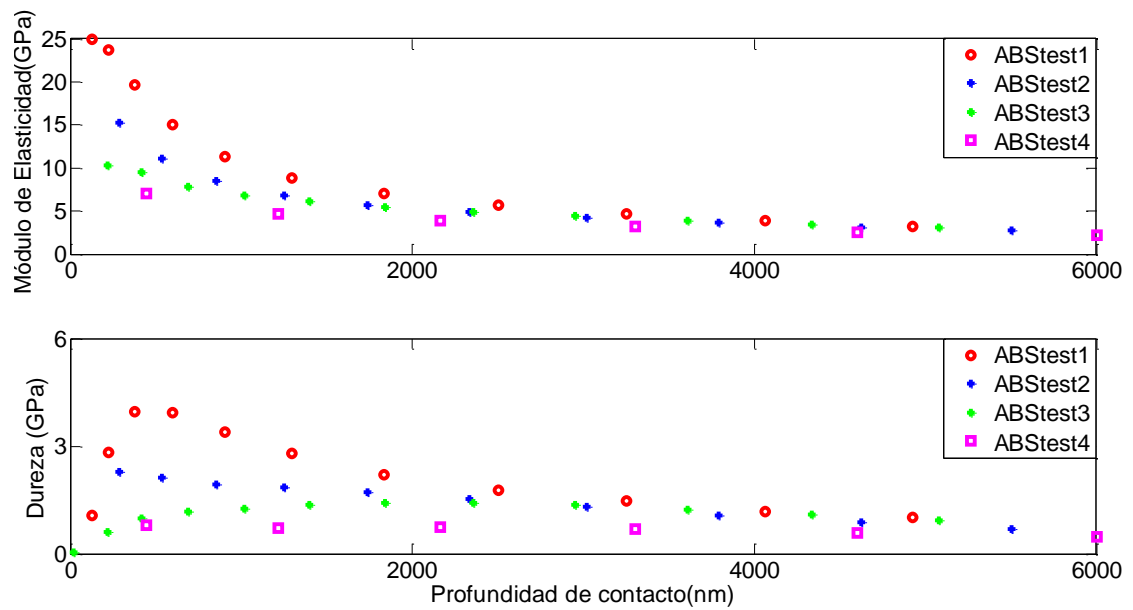
**Figura 42. Carga normal vs profundidad de contacto durante la nanoindentación del LDPE.**



La figura 43 a), b) muestra tres repeticiones en diferentes lugares para la medición del módulo de elasticidad reducido y la dureza como función de la profundidad de contacto para el ABS, es interesante ver en esta figura que durante los primeros 1200 nm, la dureza y el módulo de elasticidad reducido, muestran una dispersión significativa. Esta dispersión, puede ser atribuible a la morfología del ABS el cual es un material bastante duro, rugoso, y poroso. Para profundidades de contacto superiores a los 1200 nm, el valor promedio de la dureza es de 1.28 GPa, mientras que el del módulo de elasticidad reducido fue de 5.5 GPa. Puesto que las pruebas fueron realizadas directamente sobre el recubrimiento polimérico, el

módulo de elasticidad reducido se encuentra dentro del rango alto de los valores publicados en la literatura.

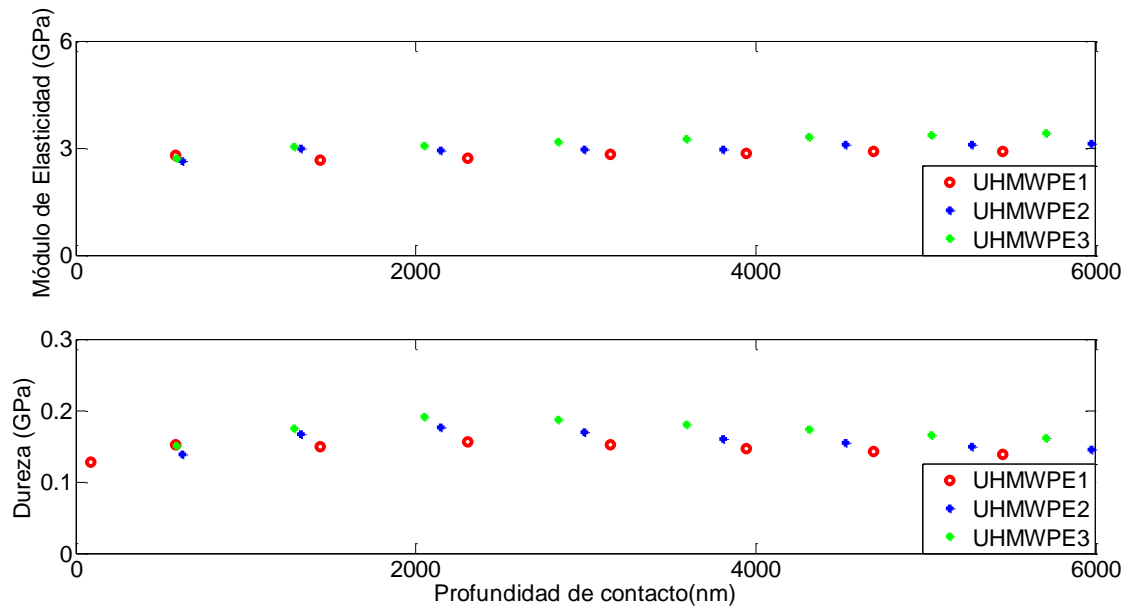
**Figura 43. Dureza a) y módulo de elasticidad reducido b) del ABS como función de la profundidad de contacto**



Los resultados de nanoindentación para el UHMWPE se muestran en la figura 44 a), b) obteniéndose una dureza de 0.17 GPa y un módulo de elasticidad de 2.99 GPa.



**Figura 44. Dureza a) y módulo de elasticidad reducido b) del UHMWPE como función de la profundidad de contacto.**



La Tabla 2 muestra el resumen de los valores de módulo de elasticidad reducido y dureza para los diferentes recubrimientos

**Tabla 2. Valores obtenidos de módulo de elasticidad reducido y dureza para los recubrimientos.**

Material	E (GPa) 1sd	H (GPa) 1 sd
ABS	5,50±4,43	1.28±0,77
UHMWPE	2,99±0,97	0,15±0,05

Una vez obtenidas las propiedades mecánicas, es posible calcular el grado de deformación y la máxima presión de contacto inducido durante la prueba de pin-on-disk, a fin de corroborar las hipótesis relacionadas con la deformación del recubrimiento y su interacción con el sustrato. Las ecuaciones que permiten determinar el radio del círculo de contacto y la máxima presión de contacto, para un contacto de punto (esfera) sobre superficie plana son:

$$a = \left\{ \frac{3WR}{4E^*} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde  $a$  es radio del círculo de contacto,  $W$  es la carga normal,  $R$  es el radio de curvatura, y  $E^*$  es el módulo de elasticidad reducido. El módulo de elasticidad reducido se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$E^* = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde  $\nu_1$  y  $\nu_2$  son los módulos de Poisson de los materiales en contacto y  $E_1$  y  $E_2$  son los módulos de elasticidad de los mismos materiales. La deformación inducida durante el contacto es una función de los parámetros anteriores:

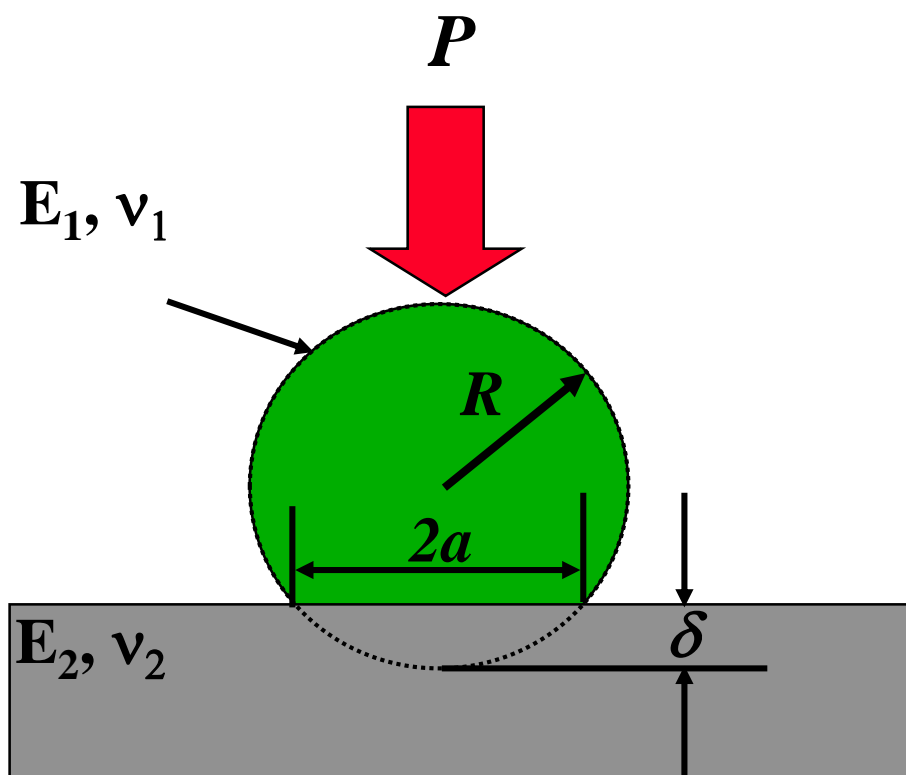
$$\Delta = \frac{a^2}{R} = \left\{ \frac{3W^2}{16RE^*} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Con base en las ecuaciones anteriores se obtienen los resultados mostrados en la tabla 3. Los resultados obtenidos indican que para el tipo de geometría empleado durante la prueba de pin-on-disk (radio de la esfera 2 mm) y bajo una carga normal de 10 N las deformaciones normales obtenidas fueron de 0,91, y de 0,78  $\mu\text{m}$  para el ABS, y el UHMWPE respectivamente. En la tabla 3, se hace referencia al tamaño de la huella (deformación) generada durante la deformación producida por esfuerzos Hertzianos de punto (ver figura 45)

**Tabla 3. Valores obtenidos mediante contacto elástico Hertziano de punto.**

Material	E (GPa) 1sd	$\nu$	$E^*$ (GPa)	W (N)	a ( $\mu\text{m}$ )	$\delta(\mu\text{m})$
ABS	5,50±4,43	0,35	6,09	10	134,9	0,91
UHMWPE	2,99±0,97	0,46	3,73	10	125,5	0,78

Figura 45. Representación de contacto Hertziano de punto (esfera vs superficie plana)



## **11. APLICACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS POLIMERICOS EN LA INDUSTRIA**

El propósito de usar polímeros reciclados en el presente proyecto, fue el de ofrecer una solución al problema actual del desperdicio industrial. Recubrir componentes metálicos como maquinaria, equipos a presión, tanques atmosféricos, silos, entre otros, con polímeros puede permitir, ofrecer resistencia al desgaste y a la corrosión. Adicionalmente, en situaciones de contacto por deslizamiento, es posible reducir (mediante un coeficiente de fricción dinámico bajo), los costos energéticos producidos por la pérdida de potencia y las emisiones al medio ambiente.

Un recubrimiento polimérico se puede utilizar en la industria con diferentes propósitos, entre los cuales se pueden mencionar, aislante eléctrico, aislante térmico, como lubricante, y como anticorrosivo. En aplicaciones anticorrosivas se puede emplear como pintura para equipos que están en cualquier tipo de ambiente, industriales, acuáticos entre otros, una sola capa del polímero puede reemplazar todas las capas de pinturas que se le aplican a los equipos de alta presión de tanques atmosféricos, intercambiadores de calor, también puede ser utilizado para recubrir pasamanos del transporte público o juegos infantiles, entre otros.

Como un aislante eléctrico se puede utilizar en estructuras metálicas que estén expuestas a alguna línea eléctrica, o para recubrir los polos a tierra de diferentes estructuras.

Como un aislante térmico se puede utilizar para recubrir techos o recintos en los cuales sea necesario disminuir la transferencia de calor desde el ambiente hacia el interior del recinto

Como un lubricante para aumentar el tiempo de vida de elementos mecánicos ejemplos:

- En las bombas de desplazamiento positivo en seco, las paletas de este equipo están fabricadas de grafito para que se auto lubriquen, sin embargo estas se desgastan en corto tiempo en comparación a otras bombas, una aplicación del recubrimiento, puede ser que las paletas sean de acero y tengan un

recubrimiento que sirva como lubricante, así seguirían siendo bombas en seco y probablemente prolonguen la vida útil, otra aplicación puede ser entre otros.

- En las bancadas de herramientas mecánicas, hay que lubricarlas constantemente para que estas no se desgasten, una solución puede ser que para bancadas de poco peso se aplicase un recubrimiento polimérico, evitando así la constante lubricación.
- En los pistones neumáticos, la mayoría de estos no tienen lubricación, una manera de lubricarlos puede ser recubriendo con polímero el agujero por donde pasa el vástago del pistón.

Un recubrimiento polimérico no necesariamente está limitado a aplicaciones industriales, este puede ser utilizado en otros campos como decoración, artesanías, automóviles, entre otros.

## 12. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en el coeficiente de fricción mediante pin-on-disk, la delaminación, y el desgaste del polímero, se puede concluir que el mejor polímero reciclado que se puede emplear como un recubrimiento que estará sometido a fricción es el ABS, ya que al aplicar el proceso de deposición y curado este no se delaminó en ninguna de las pruebas. También se observó que en la pruebas a 10N de carga normal, a pesar de que el balón penetró el recubrimiento, no se observó desgaste adhesivo debido a la presencia de terceros cuerpos.

Se observó que el acabado superficial del sustrato solo influyó en el LDPE, pues fue el único recubrimiento que se delaminó, se notó que este se delaminó con mayor facilidad en las superficies lisas independientemente de la carga aplicada.

Los resultados obtenidos indican que efectivamente bajo la carga normal y contacto Hertziano de punto (esfera contra superficie plana), la deformación sufrida por los recubrimientos fue inferior al espesor de los mismos, por lo que se descarta interacción con el sustrato. Estos resultados ponen en evidencia que efectivamente los incrementos y variaciones en los coeficientes de fricción con un incremento en la carga, están relacionados con la transferencia de material y no con la interacción con el sustrato.

Finalmente, estos recubrimientos muestran potencial para ser aplicados a nivel industrial y atacar problemas de diversa índole. Es posible que mediante la implementación de un sistema criogénico, sea posible disminuir el tamaño de partícula y por ende el espesor final de los mismos después de cada pasada.

## BIBLIOGRAFÍA

ABRAMOVICH BERSHTEĬN Vladimir. MIHAJLOVIČ EGOROV Viktor. Differential Scanning Calorimetry of Polymers. New York: Ellis Horwood, 1994. 253 p.

AVILA Antonio F. DUARTE Marcos V. A mechanical analysis on recycled pet/hdpe composite polymer Degradation and Stability. Junio, 2003, vol. 80, p. 373–9.

DE ANDRADE SILVA Flavio. CHAWLA Nikhilesh. DIAS DE TOLEDO Romildo. Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers, Composites Science and Technology. Febrero, 2008 vol. 68, p. 3438–5.

DEMIRCI I. GAUTHIER C. SCHIRRER R. Thin Solid Films: Mechanical analysis of the damage of a thin polymeric coating during scratching: role of the ratio of the coating thickness to the roughness of a scratching tip, Enero 2005, vol. 479.

ESCOBAR NUÑEZ Emerson. YEO Seung Min. POLYCHRONOPOULOU Kyriaki. POLYCARPOU Andreas A. Tribological study of high bearing blended polymer-based coatings for air-conditioning and refrigeration compressors. En: Surface & Coatings Technology. Noviembre, 2011, vol. 205, p. 2994–3005.

ESCOBAR NUÑEZ Emerson. POLYCARPOU Andreas A. The effect of surface roughness on the transfer of polymer films under unlubricated testing conditions. En: Wear, Enero, 2015, vol. 326-327, p. 74–9.

ESCOBAR NUÑEZ Emerson. DEMAS Nicholaos. POLYCHRONOPOULOU Kyriaki. POLYCARPOU Andreas A. Comparative scuffing performance and chemical analysis of metallic surfaces for air-conditioning compressors in the presence of environmentally friendly CO<sub>2</sub> refrigerant. En: Wear, 2010, Vol. 268, p 668–676.

ESCOBAR NUÑEZ Emerson. POLYCARPOU Andreas A. Wear study of metallic interfaces for air-conditioning compressors under submerged lubrication in the presence of carbon dioxide. En: Wear, Diciembre, 2015, vol. 326-327, p. 28–7.

GAÑÁN P. MONDRAGON I. Thermal and degradation behavior of fique fiber reinforced thermoplastic matrix composites, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2003, vol. 73, p. 783-12.

GONZÁLEZ GUZMÁN Jorge Antonio. Protección frente a la corrosión metálica con recubrimientos poliméricos: estudio electroquímico y micro electroquímico. Trabajo de grado Doctoral. San Cristóbal de la laguna: Universidad de la laguna. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica, 2008.

HIDALGO SALAZAR Miguel A. NEVES Fernando Luiz. BAENA Eduardo. Posibilidades de fabricación con el polietileno aluminio obtenido del reciclaje de envases multicapas. En: Informador Técnico. Sena Astin. Julio - Diciembre, 2013, vol.77 núm. 2, p 100-109.

HULL D. and CLYNE T.W. an Introduction to Composites Materials, Cambridge University Press, 1996, 320 p.

KUDISCH Ilya I. COVITCH Michael J. Modeling and analytical methods in tribology, boca raton: Chapma & Hall/CRC, 2010, 905 p.

MYANT C. SPIKES H.A. STOKES J.R. Influence of load and elastic properties on the rolling and sliding friction of lubricated compliant contacts. En: Tribology International. Mayo, 2010, vol.43, p. 55–8.

Nanoindentation. [En línea]. Research Center for Non Destructive Testing GmbH (RECENDT), 2015 [consultado el 15 de Octubre de 2014]. Disponible en Internet: [http://www.recendt.at/58\\_ENG\\_HTML.php?g\\_currMenuName=58](http://www.recendt.at/58_ENG_HTML.php?g_currMenuName=58).

OCAK Yılmaz. SOFUOGLU Aysun. TIHMINLIOGLU Funda. BOKEC Hasan. Progress in Organic Coatings: Protection of marble surfaces by using biodegradable polymers as coating agent. Julio, 2009, vol. 66.

OSSWALD Tim A. Materials Science of Polymers for Engineers, Hanser, 1996.



SHIPWAY P.H. BROMLEY J.P.D. WESTON D.P. Wear: Removal of coatings from polymer substrates by solid particle blasting to enhance reuse or recycling. Marzo, 2007, vol. 263.

Thermal Properties of Polymers. Selb [en línea]. NETZSCH, 2014 [consultado 22 de Agosto de 2014]. Disponible en Internet: <http://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/home.html>.

TI 950 TriboIndenter. [En línea]. HYSITRON, 2015 [consultado 30 de Agosto de 2014]. Disponible en Internet: <http://www.hysitron.com/products/ti-series/ti-950-triboindenter>

YEO Seung Min. ESCOBAR NUÑEZ Emerson. POLYCARPOU Andreas A. Tribological Performances of Polymer based Coating Materials Designed for Compressor Applications. En: Advances in Science and Technology. 2010, Vol. 64, p. 33-9.

## ANEXOS

### Anexo A. Resultados de la prueba de rugosidad

Acero estructural rectificado			Acero estructural lija 150		
Cuoff	transversal		Cuoff	transversal	
Longitud de recorrido	0,8	mm	Longitud de recorrido	0,8	mm
Velocidad	4	mm/s	Velocidad	4	mm/s
Rugosidad	0,5	μm	Rugosidad	0,5	μm
	0,6	μm		0,63	μm
	0,55	μm		0,79	μm
	0,51	μm		0,78	μm
	0,53	μm		0,61	μm
	0,57	μm		0,58	μm
	0,44	μm		0,49	μm
	0,48	μm		0,53	μm
	0,48	μm		0,72	μm
	0,49	μm		0,81	μm
promedio	0,51666667	μm	promedio	0,66	μm

Acero estructural lija 80			Acero estructural lija 60		
Cuoff	transversal		Cuoff	transversal	
Longitud de recorrido	0,8	mm	Longitud de recorrido	0,8	mm
Velocidad	4	mm/s	Velocidad	4	mm/s
Rugosidad	0,5	μm	Rugosidad	0,5	μm
	1,08	μm		1,1	μm
	0,93	μm		0,98	μm
	1,07	μm		1,27	μm
	1,01	μm		1,12	μm
	0,94	μm		0,93	μm
	1,17	μm		1,18	μm
	1,03	μm		1,32	μm
	0,74	μm		0,79	μm
	0,79	μm		0,99	μm
promedio	0,97333333	μm	promedio	1,07555556	μm

Acero estructural lima			Aluminio fresado		
Cuoff	transversal		Cuoff	transversal	
Longitud de recorrido	0,8	mm	Longitud de recorrido	0,8	mm
Velocidad	4	mm/s	Velocidad	4	mm/s
Rugosidad	0,5	µm	Rugosidad	0,5	µm
	2,25	µm		0,4	µm
	2,06	µm		0,35	µm
	1,98	µm		0,54	µm
	1,84	µm		0,46	µm
	1,74	µm		0,61	µm
	1,96	µm		0,44	µm
	2,11	µm		0,47	µm
	2,24	µm		0,52	µm
	2,14	µm		0,47	µm
promedio	2,03555556	µm	promedio	0,47333333	µm

Aluminio lija 150			Aluminio lija 80		
Cuoff	transversal		Cuoff	transversal	
Longitud de recorrido	0,8	mm	Longitud de recorrido	0,8	mm
Velocidad	4	mm/s	Velocidad	4	mm/s
Rugosidad	0,5	µm	Rugosidad	0,5	µm
	0,76	µm		1,69	µm
	0,94	µm		1,87	µm
	0,9	µm		1,73	µm
	0,74	µm		1,45	µm
	1,07	µm		1,47	µm
	0,85	µm		1,43	µm
	0,66	µm		1,63	
	0,71	µm		1,39	
	0,89	µm		1,42	
promedio	0,83555556	µm	promedio	1,56444444	µm

Aluminio lija 60			Aluminio lima		
Cuoff	transversal		Cuoff	transversal	
Longitud de recorrido	0,8	mm	Longitud de recorrido	0,8	mm

Velocidad	4	mm/s	Velocidad	4	mm/s
Rugosidad	0,5	μm	Rugosidad	0,5	μm
	1,96	μm		3,7	μm
	1,83	μm		2,81	μm
	1,76	μm		3,32	μm
	1,88	μm		3,22	μm
	1,77	μm		3,62	μm
	1,93	μm		3,34	μm
	2,05	μm		3,57	μm
	1,68	μm		3,15	μm
	2,14	μm		3,71	μm
promedio	1,88888889	μm	promedio	3,38222222	μm

## Anexo B. Resultados de la prueba DSC

Procedimiento MDSC	
Method 1	Equilibrate at 20.00 °C
Method 2	Modulate $\pm 1.00$ °C every 60 s
Method 3	Isothermal for 5.00 min
Method 3	Ramp 3.00 °C/min to 160 °C

**Tabla 4.DSC LDPE.**

Señal	Transición vitrea 1			Transición vitrea 2			Anomalia 1	
	$T_i$ (°C)	$T_g$ (°C)	$T_f$ (°C)	$T_i$ (°C)	$T_g$ (°C)	$T_f$ (°C)	Onset Point (°C)	Entalpía (J/g)
<b>Muestra</b>								
<b>LDPE</b>								
<b>Heat flow</b>	38,25	41,78	47,36	104,46	104,93	105,85	115,11	60,14
<b>Rev Heat Flow</b>	43,08	46,23	46,96	100,78	102,61	105,31	111,75	41,84
<b>Heat Capacity</b>	39,1	41,78	46,17	107,23	107,38	107,47	111,95	40,9
<b>Rev. Cp</b>	44,3	46,24	46,37	102,22	102,75	104,04	111,95	40,9

Procedimiento MDSC	
Method 1	Equilibrate at -90.00 °C
Method 2	Modulate $\pm 1.00$ °C every 60 s
Method 3	Isothermal for 5.00 min
Method 3	Ramp 3.00 °C/min to 250 °C

**Tabla 5.DSC ABS.**

Señal	Transición vitrea 1			Anomalia 1		Anomalia 2					
	$T_i$ (°C)	$T_g$ (°C)	$T_f$ (°C)	Onset Point (°C)	Entalpía (J/g)	Onset Point (°C)	Entalpía (J/g)	Onset Point (°C)	Entalpía (J/g)	Onset Point (°C)	Entalpía (J/g)
<b>Muestra</b>											
<b>ABS</b>											
<b>Heat flow</b>	74,69	80,31	82,28	0,33	5,124	99,11	0,9482	124,67	1,028	175,57	45,42
<b>Rev Heat Flow</b>	101,74	105,69	107,95	-1,25	0,3537	127,3	0,2523	193,35	3,7145		
<b>Heat Capacity</b>	73,41	80,05	83,18	0,78	2,98	99,16	0,9333	125,66	0,8479		
<b>Rev. Cp</b>											

<b>Procedimiento MDSC</b>	
Method 1	Equilibrate at 20.00 °C
Method 2	Modulate $\pm 1.00$ °C every 60 s
Method 3	Isothermal for 5.00 min
Method 3	Ramp 3.00 °C/min to 200 °C

**Tabla 6.DSC UHMWPE.**

<b>Señal</b>	<b>Transición vítrea 1</b>			<b>Anomalia 1</b>	
<b>Muestra</b>	<b>T<sub>i</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>g</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>f</sub> (°C)</b>	<b>Onset Point (°C)</b>	<b>Entalpía (J/g)</b>
<b>UHMWPE</b>					
<b>Heat flow</b>	77,57	86,11	92,13	134,39	243,1
<b>Rev Heat Flow</b>	83,64	87,52	90,45	134,36	101,4
<b>Heat Capacity</b>				134,4	240,3
<b>Rev. Cp</b>				133,78	119,17

## Anexo C. Resultados estadísticos de la prueba de pin on disk

El 1 corresponde a acero 2 a aluminio.
El 1 es liso y 2 es rugoso.
El 1 es UHWPE, 2 es HDPE y 3 es ABS
1 es 10N y 2N

**Tabla 7. Resultados estadísticos de la prueba de pin on disk.**

sustrato	acabado superficial	matriz	carga-N	coeficiente fricción	Desviación estándar	Pérdida de masa (gramos)
1	1	1	1	0,239020077	0,003240695	0,0006
1	1	1	1			
1	1	1	2	0,55889188	0,007543005	0,000333333
1	1	1	2			
1	1	2	1	0,238139629	0,013231116	0,000166667
1	1	2	1			
1	1	2	2	0,314253018	0,008317244	0,0003
1	1	2	2			
1	1	3	1	0,304479777	0,010817903	0,000166667
1	1	3	1			
1	1	3	2	0,366419957	0,012467354	0,0003
1	1	3	2			
1	2	1	1	0,248109185	0,00308487	0,000566667
1	2	1	1			
1	2	1	2	0,560609446	0,006301739	0,000333333
1	2	1	2			
1	2	2	1	0,218844094	0,035907357	0,000666667
1	2	2	1			
1	2	2	2	0,291588449	0,006186758	0,000233333
1	2	2	2			
1	2	3	1	0,352908123	0,015840343	0,000666667
1	2	3	1			
1	2	3	2	0,345748823	0,010354079	0,000166667
1	2	3	2			

**Tabla 7. (Continuación)**

2	1	1	1	0,253830977	0,016471965	0,000666667
2	1	1	1			
2	1	1	2	0,625740133	0,006812404	3,33333E-05
2	1	1	2			
2	1	2	1	0,228491861	0,024569236	0,0004
2	1	2	1			
2	1	2	2	0,321116531	0,008032304	0,000233333
2	1	2	2			
2	1	3	1	0,32869395	0,013329123	0,00010000
2	1	3	1			
2	1	3	2	0,401067702	0,008747039	0,000233333
2	1	3	2			
2	2	1	1	0,26983306	0,005853109	0,0002
2	2	1	1			
2	2	1	2	0,622398923	0,006294041	0,000233333
2	2	1	2			
2	2	2	1	0,178698165	0,004490972	0,000233333
2	2	2	1			
2	2	2	2	0,301282928	0,006926931	0,0004
2	2	2	2			
2	2	3	1	0,332950137	0,007544625	0,0004
2	2	3	1			
2	2	3	2	0,33427087	0,020012263	6,66667E-05
2	2	3	2			